

VIGILANCIA TECNOLOGICA

RECICLAJE DE
PANELES SOLARES

UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA

ABRIL
2022



INDICE

Resumen.....	1
1.Introducción	2
2. Análisis Bibliométrico	3
2.1 Análisis Bibliométrico por Artículos Publicados Respecto al Tratamiento de Recicla de Paneles Fotovoltaicos.....	3
2.2 Análisis Bibliométrico por Patentes Registradas Respecto al Tratamiento de Reciclade de Paneles Fotovoltaicos.....	4
3. Estado del Arte.....	7
4. Tecnología de Reciclaje de PV en El Mercado.....	13
5. Conclusiones.....	15
6. Referencias.....	16

Resumen

En este informe se presenta la vigilancia tecnológica respecto al reciclaje de paneles fotovoltaicos (PV), basada en el estudio bibliométrico de artículos y patentes, esta búsqueda se centró en las bases de datos Web of Science y la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Se analizaron la cantidad de artículos y patentes por año, por país y en el caso de las patentes por aplicante, entre otros. A partir de esto se pudo identificar que el tema del reciclaje de paneles es un área en crecimiento en especial a nivel de investigación, en cuanto a las patentes se logró establecer que los últimos años la cantidad de patentes presentadas fue variable, pero en promedio no sobrepasan las 200 por año.

A su vez, se estableció un estado de arte que permitió reconocer tres tipos distintos de tratamiento para el reciclaje de PV, a saber: mecánico, químico y térmico. De estos tres, el primero es una etapa previa a la recuperación de elementos de interés, que se consigue con los otros tratamientos. Los procesos investigados en los artículos son variados, desde procesos hidrometalúrgicos hasta pirometalúrgicos, se destacan trabajos donde se utilizan diferentes procesos de clasificación, solventes, agentes oxidantes, entre otros. En el caso de las patentes, hay un número mayor de trabajos que se concentran en procesos pirometalúrgicos.

Este análisis se complementó con una prospección de las tecnologías que ya se encuentran en el mercado, varias de ellas también incluyen etapas de reducción de tamaño o deslaminado y posteriormente procesos pirometalúrgicos, se destaca también el proceso de recolección que hacen algunas empresas, esto asociado a los volúmenes de paneles que se cuentan como deshecho, que actualmente es menor como para tener un proceso continuo y operativo durante todo el año, es por esto que esta recolección se hace de varios países.



1.Introducción

En las últimas décadas ha existido un incremento de la demanda de energía en todo el mundo, causado principalmente por un aumento sustancial de la población. A su vez a medida que los efectos del calentamiento global y las emisiones de CO₂ crecen, las energías renovables toman un mayor protagonismo a la hora de mitigar el impacto ambiental de las energías convencionales. Recursos bajos en emisiones de CO₂ como La energía solar de paneles fotovoltaico (PV) son una opción de alta prioridad, debido a que es una de las formas de energía más limpias (IEA, 2015). Mientras que las emisiones generadas por la electricidad en base a combustible fósil emiten 400-1000 gr CO₂-eq/kWh la electricidad generada por paneles fotovoltaicos de silicio cristalino son de 23-81 grCO₂-eq/kWh, siendo un 5 al 8% de las emisiones con combustible fósil (Louwen et al., 2015). Los paneles fotovoltaicos son dispositivos sólidos capaces de convertir la energía de la luz solar en energía eléctrica sin necesidad de un motor térmico o equipo de rotor, existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos, entre ellos los paneles de silicio son los más comunes a nivel mundial siendo el 85%-90% de los PV del mercado. Dichos paneles están compuestos generalmente por un 77,41% de vidrio, 1,6% de filamentos metálicos, 6,77% células solares y 14,06 % de polímeros (Sah et al., 2022).

La capacidad mundial instalada de paneles fotovoltaicos en año 2019 alcanzó los 600 GW, ya para el 2050 se proyecta una instalación de 4500 GW. En cuanto a Chile, este posee uno de los mayores potenciales de energía solar en el mundo, debido a sus condiciones climáticas y a la alta radiación solar (APTA, n.d.). En el año 2020 en Chile se observó que la energía solar implementada para la producción de energía eléctrica (CNE,2020) alcanza 11% de participación de energía instalada a nivel nacional.

A pesar de su bajo impacto ambiental, los paneles solares tienen una vida útil de 20-30 años, e incluso en el norte de Chile esta vida útil puede ser cercana a los 15 años, a causa de las condiciones climáticas, y debido a su alta proyección de instalaciones futuras se provee que existirá una acumulación de paneles solares producto de falla o término de su vida útil en los próximos años. Debido a esta situación en muchos países han surgidos diferentes decretos, leyes, normativas e iniciativas para controlar los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). En Chile existe en vigencia la ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor) que establece metas asociadas a la gestión de Residuos, generados por sus consumidores en el post consumo, así como su recuperación y valorización, donde está incluido la gestión de residuos de los paneles fotovoltaicos. Actualmente a nivel mundial existen empresas de reciclaje como Veolia, Rosi-Solar, NPC Incorp y Loser Chemie que están o que proyectan el reciclaje de paneles fotovoltaicos (APTA, n.d.).

Este informe entrega una vigilancia tecnología respecto al reciclaje de paneles fotovoltaicos. Analiza el estado actual del reciclaje de paneles solares mediante una evaluación de artículos, patentes y tecnologías en estudio y/o aplicadas a nivel piloto o industrial.



2. Análisis Bibliométrico

2.1 Análisis Bibliométrico por Artículos Publicados Respecto al Tratamiento de Recicla de Paneles Fotovoltaicos

En esta sección se presenta el resultado del análisis bibliométrico, realizado a la búsqueda de artículos de procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos. La información a analizar se obtuvo de la colección de bases de datos de referencias bibliográficas y citas de publicaciones Web of Science.

Principalmente se realizó una búsqueda utilizando las siguientes palabras claves: “solar panel, recycling y process”, a partir de esta búsqueda se obtuvieron 94 resultados los cuales fueron analizados. Básicamente se tomaron en cuenta dos enfoques, el primero consta de la cantidad de artículos publicados por país, en la figura 1 y tabla 1 se presenta el top 10 de países que concentran la mayoría de los artículos publicados.

País	Recuento	Porcentaje
CHINA	15	16,0%
ITALY	14	14,9%
AUSTRALIA	13	13,8%
USA	10	10,6%
ENGLAND	9	9,6%
INDIA	6	6,4%
JAPAN	6	6,4%
SPAIN	6	6,4%
BRAZIL	5	5,3%
SOUTH KOREA	4	4,3%

Tabla 1. Cantidad de artículos publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por países.

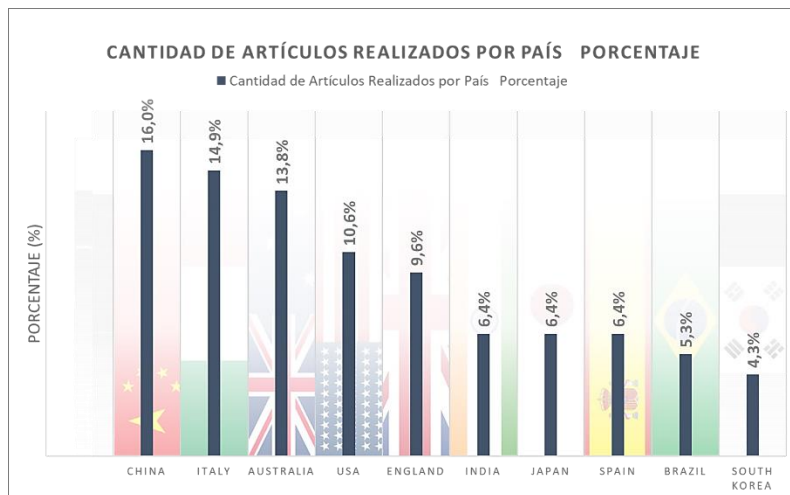


Fig. 1. Cantidad de artículos publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por países.

Como se observa en la figura 1, China presenta el mayor porcentaje de publicaciones realizadas con respecto a la búsqueda señalada, teniendo el 16 % de las publicaciones a nivel mundial seguido de Italia y Australia con un 14.9% y 13.8%, respectivamente. Esto se debe a que China es uno de los países que más ha avanzado en la implementación de energía con paneles fotovoltaicos. En Chile el tema del reciclaje fotovoltaico sigue en desarrollo, según la búsqueda realizada solo existe un artículo publicado el año 2020 por Chile, lo que presenta un desafío y

oportunidad para la comunidad científica nacional, debido a que el norte del país posee altas condiciones y proyecciones para la generación de energía fotovoltaica.

El segundo enfoque del análisis de la búsqueda fue por la cantidad de artículos publicados por año, en la figura 2 y tabla 2 se observa un claro aumento de las publicaciones con una tendencia exponencial, lo que indica que a medida que transcurran los años la cantidad de artículos de este tipo serán sustancialmente mayores, solo entre el año 2017 al 2021 hubo un aumento del más del 200% de publicación hechas relacionadas con el reciclaje de paneles fotovoltaicos en la búsqueda realizada. A medida que pasan los años el interés de la comunidad por el reciclaje de paneles solares va en ascenso, por ejemplo, en la figura 1, Estados Unidos está en el cuarto lugar de los países con más publicaciones realizadas, pero en los últimos tres años ha publicado siete artículos, obteniendo la mayor cantidad de publicaciones después de China entre el año 2020-2022, esto puede ser debido a que USA es uno de los países con una importante presencia de energía de paneles fotovoltaicos.

Tiempo (años)	Cantidad	Porcentaje (%)
2021	13	26%
2018	8	16%
2019	8	16%
2020	6	12%
2017	5	10%
2013	3	6%
2016	3	6%
2015	2	4%
2001	1	2%
2022	1	2%

Tabla 2. Cantidad de artículos publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por año.

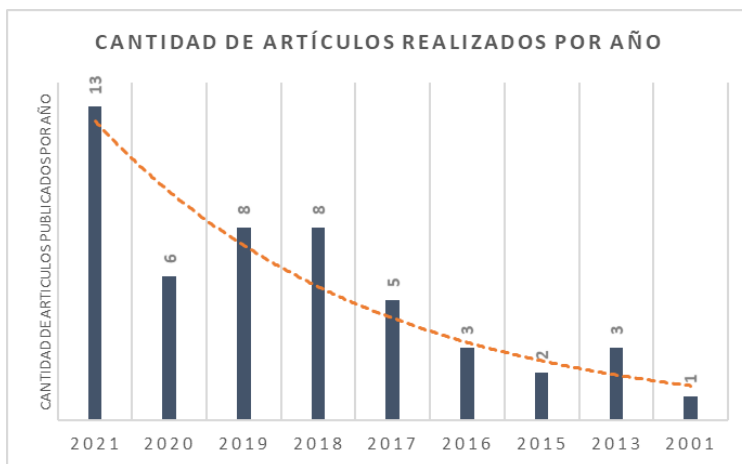


Fig. 2. Cantidad de artículos publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por año.

2.2 Análisis Bibliométrico por Patentes Registradas Respecto al Tratamiento de Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos

Se realizó una búsqueda de patentes para métodos de reciclaje de paneles fotovoltaicos. La información obtenida se extrajo de la base de datos PATENTSCOPE que proporciona acceso a las solicitudes internacionales del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT). La búsqueda se llevó a cabo bajo las siguientes palabras: “recycling, photovoltaic panels, modules, method, process y solar cells”, a partir de esta búsqueda se obtuvieron 2.108 resultados de patentes que incluyeran alguna de estas palabras en toda su estructura. De las patentes seleccionadas la gran mayoría pertenece a la clasificación de H01L que trata sobre elementos eléctricos básicos específicamente de dispositivos semiconductores, con una subclasificación correspondiente a H01L 31/00 dispositivos semiconductores sensibles a la radiación de la luz y especialmente adaptados para convertir la energía de dicha radiación en energía eléctrica, también hace

referencia a procesos o aparatos especialmente adaptados para la fabricación o tratamiento de los mismos o de sus partes.

Al igual que el análisis por artículo de la sección anterior se tomaron en cuenta dos enfoques, el primero consta de la cantidad de patentes publicadas por país, en la figura 3 y tabla 3, se presenta el top 10 de países que concentran la mayoría de las patentes publicadas.

País	Recuento	Porcentaje
USA	1096	52,0%
PCT	556	26,4%
EUROPEAN PATENT OFFICE	151	7,2%
AUSTRALIA	111	5,3%
INDIA	97	4,6%
CANADA	70	3,3%
UNITED KINGDOM	15	0,7%
SINGAPORE	4	0,2%
SOUTH AFRICA	4	0,2%
NEW ZEALAND	2	0,1%

Tabla 3. Cantidad de patentes publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por países.

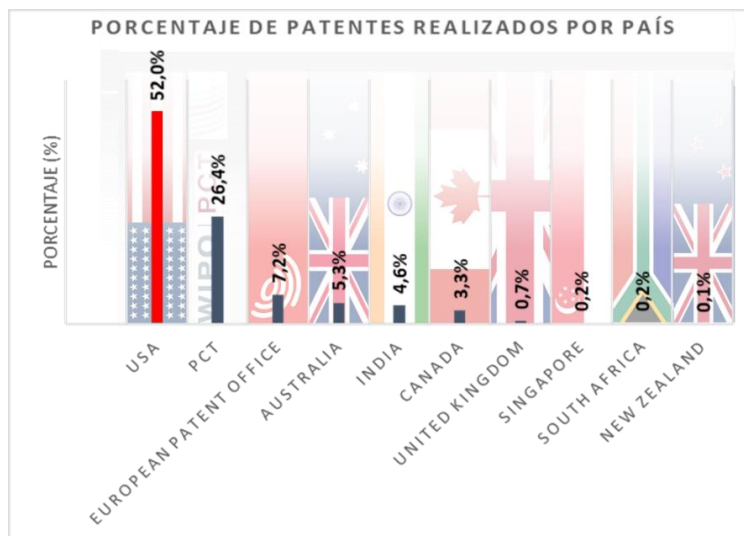


Fig. 3. Cantidad de patentes publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por países.

A diferencia del análisis de la sección anterior aquí la predominancia de patentes realizadas por países está concentrada en Estados Unidos, quien se lleva más del 50% de todas las patentes publicadas sobre el reciclaje de paneles fotovoltaicos según la búsqueda realizada (ver figura 3), esto se puede atribuir que la energía solar en los Estados Unidos es una de las industrias con mayor actividad en el mercado fotovoltaico mundial, debido a la proyección de esta industria urge la necesidad de llevar a cabo tecnologías y/o métodos que permitan el reciclaje de los paneles fotovoltaicos al terminar su vida útil, y evitar una posible contaminación a gran escala de PV futura. Mientras que la segunda mayoría de inscripciones de patentes es propiedad del Tratado de Cooperación en Materia de Patentes (PCT) que equivale al 26,4%, luego le siguen países como Australia, India, Canadá, entre otros en una menor proporción.

En cuanto a la cantidad de patentes publicados por años, existe una diferencia significativa entre las publicaciones de artículos y las de patentes, anteriormente cuando se hablaba de la cantidad de artículos por años se observaba un aumento a medida que pasan los años, atribuido a la necesidad de conocer métodos necesarios para el reciclaje de PV después de su vida útil, sin embargo cuando hablamos de patentes publicadas por años en la búsqueda realizada, no se observa un creciente aumento de publicaciones de patentes a medida que pasan los años, e incluso se observa en la figura 4 y tabla 4 que la mayor cantidad de patentes registradas fue en los años 2014 y 2020, existiendo 160 y 230 publicaciones de patentes, respectivamente, siendo una cantidad fluctuante de patentes durante estas últimas dos décadas que varían entre los 113 y 230 publicaciones por año.

Tiempo (años)	Cantidad	Porcentaje (%)
2021	113	26%
2020	160	12%
2019	129	16%
2018	124	16%
2017	118	10%
2016	151	6%
2015	153	4%
2014	230	6%
2013	139	2%
2022	27	2%

Tabla 4. Cantidad de patentes publicados respecto a tratamientos de reciclaje de PV por año

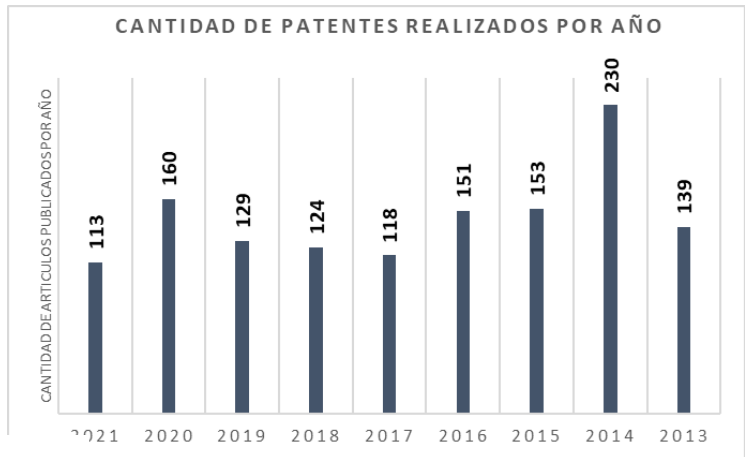


Fig. 4. Cantidad de patentes respecto a tratamientos de reciclaje de PV por año.

Analizando la cantidad de patentes obtenidas por aplicantes se observa en la figura 5, que la mayor cantidad de patentes encontradas en la búsqueda corresponde a PIXTRONIX INC, la cual es una empresa de tecnología que desarrolla tecnologías de visualización optimizadas para dispositivos multimedia, llevándose consigo el 32 % de las patentes realizada bajo la búsqueda que aborda el reciclaje de paneles fotovoltaicos, después le siguen empresas como BASF SE (empresa química), FLEX LIGHTING II LLC (fabricación de equipos de iluminación eléctrica) SOLEXEL INC (tecnología solar fotovoltaica), NANOSYS INC (desarrolla y fabrica materiales con nanotecnología), entre otras, las cuales bordean cada una el 10% de las patentes obtenidas en la búsqueda realizada.

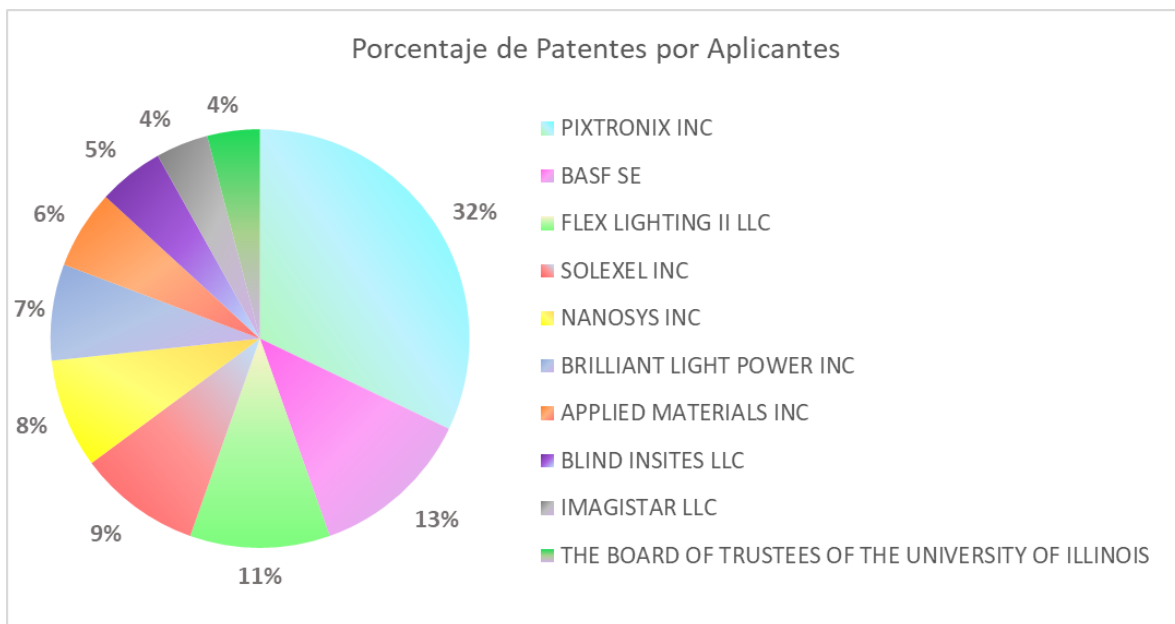


Fig. 5 Aplicantes de patentes en términos de porcentaje.



3. Estado del Arte

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) se espera que, para la llegada del 2050, aproximadamente el 11% de toda la energía producida en el mundo sea generada a través de la energía solar. Sin embargo, debe tomarse en consideración que los paneles fotovoltaicos (PV) tienen una vida útil que bordea entre los 25 a 30 años (Padoan et al., 2019), luego de esto los PV se convierten en un desecho electrónico sin un tratamiento de reciclaje definido. Con el fin de coartar el impacto negativo de los residuos fotovoltaicos debido a su crecimiento proyectado, por medio de la comisión de la Unión Europea (UE) se ha incluido a los paneles fotovoltaicos en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)(Azeumo et al., 2019), donde la legislación toma en consideración el reciclaje de desechos electrónicos. Esto quiere decir que todos los fabricantes, distribuidores y vendedores de energía fotovoltaica tienen la obligación legal de garantizar la recogida y el reciclaje, lo que incluye la financiación, la notificación y la administración correspondientes, de sus productos desechados dentro de las fronteras europeas (Balaji N. et al., 2020).

Debido a la proyección de residuos fotovoltaicos que oscilan entre 1,7 y 8 millones de toneladas para 2030 y 60 a 78 millones de toneladas para el 2050 (Stephanie Weckend et al., 2016), urge la necesidad de seguir desarrollando métodos de reciclaje que permitan la reutilización de desecho de paneles solares, además de considerar que los paneles fotovoltaicos de silicio (PV c-Si) tanto monocristalino o policristalinos contienen materiales de interés como Cu, Ag, Pb, Sn, Al y Si, siendo estos tipos de panel los más utilizados a nivel mundial. Existen varios autores que proponen distintos métodos para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, los cuales se enfocan principalmente en la recuperación de los metales valiosos y/o la celda solar, siendo divididos en tres tratamientos: tratamientos mecánicos, químicos y térmicos (ver figura 5).

Por una parte, están los tratamientos de fragmentación de material para facilitar el proceso de extracción de los metales de valor. Nevala et al. propusieron la fragmentación electrohidráulica (EHF) como una alternativa a la trituración convencional utilizada en el reciclaje de PV (Nevala et al., 2019). Reportan que la contaminación es mínima en comparación al polvo residual del proceso de trituración convencional, reduciendo los impactos ambientales y siendo un punto a favor de este proceso. El método consta de introducir pedazos de PV c-Si de 12cm x 8cm de 85 gr de cada uno en el reactor EHF de 2L de capacidad, el cual fue llenado con agua, empleando una energía a 600 J por 300 y 500 s, esto provocó el desprendimiento y fragmentación de las capas del PV, por medio de la tecnología de ondas de choque que proporciona una mayor selectividad, al concentrar los metales objetivos en fracciones de tamaño de partículas específicas, ya que los materiales de mayor concentración facilitan su posterior procesamiento y extracción a través de los procesos industriales actuales. Este tipo de proceso es prometedor para la preparación del material para la extracción de metales valiosos. Bai-Peng Song por su parte, planteó un enfoque de reciclaje novedosos y respetuosos con el medio ambiente de PV c-Si policristalino mediante el uso de descarga de pulsos de alto voltaje en agua, llamada fragmentación de alto voltaje (HVF), bajo diferentes condiciones de descarga (B. P. Song et al., 2020). Los resultados mostraron que la descarga a través de la superficie y el interior de los paneles fotovoltaicos produjo agujeros redondos por ablación, partículas de metal pulverizadas y canales dendríticos. Con la HVF se

observó que el tamaño de partícula promedio disminuyó con el ascenso del número de pulsos y la amplitud de voltaje. La condición óptima para la HVF fue de 160 kV después de 300 pulsos con 192,99 J/g consumidos. Al finalizar el proceso se obtuvo que el 95 % Cu y 96% Ag se encontraban en tamaños inferiores a 1 mm, por otro lado, el 85% de Al se hallaba entre 0,25 a 2 mm, y que el 85% de Pb y el 87 % de Sn se encontraban en tamaños inferiores a 0,5 mm. La HVF tiene un costo bajo, la fragmentación podría lograrse a 160 kV después de 300 pulsos con un consumo de energía de 200 J/g (0,056 kWh/kg), solo la mitad del de los tratamientos mecánicos (0,111 kWh/kg). Además, se evaluó el costo de electricidad de la HVF y enfoques mecánicos, independientemente de la depreciación del equipo, se evaluó en \$ 0,006/kg frente a \$ 0,012/kg, respectivamente, con el precio de electricidad de \$ 0,107/kWh en el mercado chino.

Desde otro punto de vista existen autores que se enfocan en la recuperación de metales valiosos, células solares y/o del copolímero de etileno-acetato de vinilo (EVA). Xiaotong Li presentó el reciclaje de EVA por irradiación láser pulsado de fibra óptica de infrarrojo (Li et al., 2022). El láser paso a través del EVA posterior para llegar a la interfaz de celda solar/EVA. La energía del láser era absorbida por el electrodo de metal posterior (Al y Ag), lo que provocó un aumento de la temperatura en la interfaz de la celda solar/EVA, donde el aumento de temperatura puede debilitar la fuerza adhesiva entre la celda solar y el EVA, lo que facilitó el despegue de la capa de EVA de la celda solar con un pelado mecánico para reciclar la capa posterior de EVA en las células solares del módulo fotovoltaico c-Si. El reciclaje de EVA por irradiación de laser puede reducir en gran medida el posible riesgo de contaminación ambiental en comparación de otros procesos de reciclaje, el procedimiento no presenta riesgos de toxicidad. Lovato et al. por su parte analizaron la eficiencia de la tecnología de fluidos supercríticos en la delaminación de paneles fotovoltaicos, con el objetivo de recuperar materiales de alto valor agregado como Ag, Si y Pb, además de polímeros y vidrio (Lovato et al., 2021). El procedimiento utilizó ScCO₂ por 60 min con tolueno y molienda planetaria de bolas. Las muestras fueron colocadas en un reactor de acero inoxidable 304 con un volumen de 98 mL, conectado a una bomba de alta presión y unido a un cilindro de dióxido de carbono (99,5 %). Finalmente se obtuvo 98,69% vidrio, 96,75% de filamentos de Pb y un 99,35% de la lámina posterior. La recuperación de Cell + EVA fue de 85,77 %. Investigaciones futuras deberían buscar reducir la toxicidad de los solventes y encontrar un mejor manejo de los residuos poliméricos residuales.

Otro tratamiento es el grabado químico que busca por medio de reactivos corroer y disolver materiales no deseados, según los artículos recopilados este método es utilizado cuando se quiere recuperar principalmente la oblea de Si de los PV c-Si, por ejemplo, Dheeraj Sah et al. informaron sobre un proceso simple para recuperar contactos metálicos y obleas de silicio de células solares de desechos de PV c-Si utilizando una solución de KOH (Sah et al., 2022). El método consta de un grabado químico, donde dos piezas de la celda etiquetadas como S1 (1,2 cm × 1,8 cm), S2 (3,6 cm × 3,4 cm) se sumergieron en 20 ml de solución de KOH 2 M a temperaturas de 110±1 °C y 85±1 °C. El grabado químico con KOH logró desprender el contacto de plata en la interfaz Silicio-plata en su totalidad, además el contacto de plata quedó libre Pb lo cual permite su utilización en otra aplicación, el plomo fue separado por la alta reactividad de KOH. En cuanto a la oblea de silicio al igual que los contactos de Ag se obtuvo un 99% de pureza, por lo tanto, la oblea recuperada en forma de polvo puede ser reutilizada para la fabricación de lingotes teniendo características muy similares a la oblea comercial. Shin et al. detallan un proceso de reciclaje para recuperar obleas

de silicio (Si) de paneles solares, utilizando solventes para Ag y Al y pasta de grabado para eliminar el antireflectante y emisor en la superficie (Shin et al., 2017). Este método consta de disolver los electrodos metálicos de Ag y Al secuencialmente en soluciones de HNO_3 (al 60% por 5 min a temperatura ambiente) e KOH (al 45% por 8 min a 80°C), respectivamente, para recuperar las obleas de Si. Las impurezas de la superficie de la oblea se eliminaron utilizando una pasta de grabado que contenía H_3PO_4 . Aunque no especifica, los resultados demuestran que, si se lleva a cabo el proceso de grabado a 320°C , la oblea reciclada todavía tiene un valor de vida útil adecuado, que es aceptable con las pautas de fabricación de nuevas células solares y que justificaría el costo del proceso. Kang et al. hablan sobre el procedimiento para la recuperación de recursos a partir de módulos fotovoltaicos residuales mediante el uso de solventes orgánicos y grabado químico (Kang et al., 2012). El solvente orgánico utilizado fue el tolueno para recuperar el vidrio templado lo que provocó la expansión de la resina EVA, mientras que el EVA se eliminó por una descomposición térmica. Las impurezas metálicas de la celda fotovoltaica se eliminaron aplicando una solución de grabado químico en la superficie de la celda utilizando una mezcla de HF (48%) y HNO_3 (70%) con H_2SO_4 (97%) por 20 min. El resultado de estos procesos fue un silicio puro del 99.9% y vidrio templado recuperado, consiguiendo una optimización en el proceso de recuperación de silicio por medio de un tratamiento superficial de los módulos.

Una manera para recuperar metales valiosos como Ag, Si y Al del PV c-Si es a través de la combinación de distintos procedimientos que ayuden a extraer los diferentes metales. Varios autores propusieron diferentes alternativas para conseguir la mayor recuperación de los metales. Entre ellos se encuentran Ribeiro Dias et al. quienes caracterizaron los materiales utilizados en los paneles fotovoltaicos e investigaron técnicas para separar estos materiales con el fin de permitir el reciclaje y ayudar en la gestión de dichos residuos (Dias et al., 2016). Se estudio tres métodos diferentes de segregación de componentes. La molienda mecánica seguida del tamizado y la separación química con ácido sulfúrico, que pudo separar el material semiconductor sumergiendo el material en recipientes con 100 ml de ácido sulfúrico al 98% por 5 días. También proponen que una pirólisis previa a la separación de material disminuiría la toxicidad del proceso químico, ya que logra degradar el EVA, despegando así las capas unidas por el material adhesivo. El análisis termogravimétrico mostró que todas las fracciones poliméricas presentes se degradaron a 500°C . En un estudio desarrollado por Ching-Hwa Lee et al. proponen un procedimiento hidrometalúrgico para recuperar los recursos valiosos de silicio (Si), plata (Ag) y aluminio (Al) de las celdas de baterías solares de silicio desechadas (Lee et al., 2013). Bajo las condiciones óptimas de lixiviación, se logró una recuperación del 100% de la lixiviación de Al y Ag. El Al se recuperó por cristalización a partir de una solución de lixiviación con H_2SO_4 a 90°C por 4h. La Ag se recuperó a través de una variedad de procesos de recuperación, como electrólisis, reemplazo y precipitación. Para recuperar Ag de la solución de lixiviación óptima con el reactivo HNO_3 , se usó HCl específicamente como agente de precipitación, se realizó una electrolisis para recuperar parte de Ag extrayendo el electrolito en varios intervalos de tiempo. Luego se tomaron 25 ml de solución que contenía Ag con la inserción de placas de Zn, y se permitió que la reacción de reemplazo sea durante 3 h. Finalmente, el silicio fue la solución restante, este estudio obtuvo la recuperación del 100% de los metales valiosos, Por lo tanto, concluyen que estos métodos podrían usarse para recuperar metales valiosos de paneles solares para alcanzar las metas de reciclaje. Frisson et al. tuvieron el objetivo de desarrollar y evaluar diferentes procesos de reciclaje, de los cuales obtuvieron dos métodos que arrojaron resultados aceptables (Frisson et al., n.d.). Se realizó una pirólisis en

reactor de lecho fluidizado relleno con arena muy fina a 450°C, luego se efectuó una secuencia general de limpieza y grabado de la metalización; para la mayoría de las obleas recuperadas se aplicó un tratamiento con HF al 15 % seguido de una solución de H₂SO₄:H₂O a 80 °C y finalmente seguido de un 40 % de HNO₃ a 80 °C. En conclusión, obtuvieron un rendimiento mecánico del 80%, el tiempo de ciclo de 1h da una capacidad de 576 obleas/h, el costo total de inversión fue de 575.000 euros para el proceso completo, mientras que el costo por oblea recuperada fue 0,215 euros. Las obleas de silicio recuperadas conservaron su alta calidad inicial, lo que resultó en células solares recicladas de alta eficiencia, siendo un proceso de reciclaje rentable. Qingming Song et al. a diferencia de los otros autores que utilizan PV de silicio, estos autores proponen el reciclaje de PV CIGS (Cu-In-Cd-Ga-Se), usando un método de electrodeposición secuencial para la obtención del metal puro del sistema cuaternario Cu-In-Cd-Ga de una manera más eficiente y respetuosa con el medio ambiente (Q. Song et al., 2021). Para esto procedieron a utilizar 2 gr de CuGa_{0.3}In_{0.7}Se₂ proveniente de un panel de PV CIGS con previo proceso de conminución para proceder a una tostación oxidante en un horno tubular por 4 horas a temperatura de fraguado y una lixiviación con HCl diluido a 800°C como pretratamientos para separar el SeO₂, transformar y disolver los compuestos metálicos correspondiente. Luego la electrodeposición se llevó a cabo con una configuración con tres electrodos uno de calomelano saturado frente a un electrodo de hidrogeno como referencia y una placa de platino como contraelectrodo. La electrodeposición de In y Cd mostró una cinética rápida, seguida por la electrodeposición de Cu, Zn y Ga. Esta propuesta para el reciclaje de CIGS podría reducir alrededor del 90 % el impacto del calentamiento global en comparación con los procesos de minería virgen y de referencia, además la propuesta es ventajosa en la reducción del consumo de reactivos, lo que resulta en un menor costo.

Además de la información otorgada por artículos ya expuestos, se tiene la información que puede obtenerse de las patentes de inventores que proporcionan posibles soluciones al reciclaje de PV. Entre ellos esta Pasin quien propuso un método de reciclaje de vidrio para PV (PASIN, 2013). En concreto, alimenta una carga de PV sobre la cinta transportadora llevado a la zona de maniobra comprendida entre los dos rodillos dentados. Estos giran en sentido contrario y tan pronto como el extremo del panel se inserta en el área operativa los rodillos arrastran todo el panel (PF), donde los dientes de la pareja de rodillos realizan un primer aplastamiento, logrando la separación de la capa de vidrio exterior del panel, eliminando así aproximadamente un 25-30% del vidrio, luego el 70% hasta eliminar el restante del vidrio, provocando así un tercer aplastamiento y separación de la capa de vidrio externa del panel. Shiyuan también propuso otro de tratamiento mecánico que proporciona un método para descomponer y reciclar paneles fotovoltaicos, que es respetuosa con el medio ambiente y de bajo consumo de energía (Wang Shiyuan et al., 2012). Se compone de 6 pasos: retire el marco y la caja de conexiones, cortar la celda fotovoltaica en tamaños relativamente pequeños aproximadamente de 100X80mm, luego pasa por una extrusión y cizallamiento de los fragmentos de células fotovoltaicas, se retira la capa del panel de vidrio que se recicla directamente, se muele las partículas del material y se tamizan para obtener partículas de silicio, partículas de tablero y partículas de EVA, el proceso de conminución comprende de una módulo de molienda criogénica con nitrógeno que genera el ambiente de baja temperatura y muele las partículas del material de unión para obtener las partículas de silicio, las partículas de la placa posterior y las partículas de EVA. El diámetro de las partículas de silicio es mayor que malla 80, el diámetro de las partículas de la placa trasera es mayor que malla 20 y menor que malla 80, y el diámetro de las partículas de EVA es menor que malla 20. Hay autores que presentan ideas más

innovadoras respecto a la separación mecánica como lo ha hecho Xinjuan quien presento métodos mecánicos tales como trituración y batido rotatorio para desmontar y recuperar módulos fotovoltaicos (LI XINJUAN et al., n.d.). Como es lo normal se retira el marco, la caja de conexiones y el panel de vidrio del PV manualmente. Luego con una cizalla se corta la distribución inicial en fragmentos de 5-20 mm de largo y ancho, se colocan los fragmentos en una trilladora cerrada tipo 5TY-230, configurando la velocidad de rotación en 1000-2000 rpm y el tiempo de pelado de 1-5 min, posteriormente se coloca en una trampa de metal a una frecuencia del transmisor electromagnético de 100-500 KHz, la soldadura y la barra colectora se separan, la mezcla restante se coloca en un tamiz vibratorio antiestático con un tamaño de poro de 200-1000 μm , y el polvo de silicio se clasifica para obtener una mezcla que contiene fragmentos de película EVA y de panel trasero. La mezcla se clasifica mediante un separador ciclónico para obtener fragmentos de lámina trasera y fragmentos de película EVA. La velocidad del viento del separador ciclónico es de 10-30 m/s, y el volumen de aire es de 1000-3000 metros cúbicos/ hora. Los metales valiosos son dispuestos en un recipiente hermético al vacío para calentarlo a 1750 °C para enriquecer la plata en la fase gaseosa, el estaño y el cobre en la fase líquida y, después de la separación gas-líquido, se calienta la fase líquida. A 2270°C, el estaño se enriquece en la fase gaseosa, el cobre se enriquece en la fase líquida y se realiza la separación gas-líquido para obtener estaño elemental y cobre elemental. También hay inventores que proponen el uso combinado de tratamientos como Zambon y Cerchier, quienes proponen un método que permita separar el vidrio del silicio del panel fotovoltaico de forma económica, reduciendo los costes de construcción y mantenimiento de la planta, por medio de separación mecánica y tratamiento térmico (ZAMBON & CERCHIER, 2019). En primera instancia se elimina el marco y los componentes eléctricos. Luego el panel fotovoltaico se coloca sobre una cinta transportadora que lo lleva a través de un horno a más de 500 °C, suficiente para descomponer las placas aislantes de unión y la lámina trasera, permitiendo así la separación de las capas del PV, donde en el vidrio se separa de las células fotovoltaicas. A la salida del horno es llevado por la cinta transportadora hasta un punto de caída por gravedad. La caída provoca que el vidrio (típicamente en pedazos), los contactos metálicos y los elementos de células de silicio fotovoltaicas se separen entre sí, dejándose caer en una caja colectora que esta provista en la parte superior con una rejilla, cuya malla permite el paso de las piezas de vidrio y de los elementos de silicio, al tiempo que impide el paso de los contactos metálicos. Debajo de la cinta transportadora debe existir algún tipo de medio que genere flujo de aire, el cual por la diferencia morfológica entre los fragmentos y el comportamiento fluidodinámico se lleva a cabo una separación de los materiales en dos colectores tras la caída de vidrio y silicio respectivamente. Otros inventores como Toro quien propone una separación de los materiales, donde dependiendo del tamaño del material es derivado a un tratamiento químico o térmico (TORO LUIGI et al., 2014). Inicialmente el material pasa a una trituración primaria, seguido de una molienda secundaria y un cribado. La fracción gruesa que tiene un diámetro superior a 1 mm, se envía a una operación de tratamiento térmico o químico. El térmico se lleva a cabo a la temperatura de degradación del adhesivo y del polímero fluorado, que para el EVA puede ser de 650° C durante 30 minutos para determinar la degradación de EVA. Mientras que el químico se puede someter a lavado con un disolvente para solubilizar el adhesivo, lo que da como resultado la separación del material no reflectante de vidrio-silicio. Para ello, en el caso del EVA, se puede utilizar una mezcla al 70-30 % de ciclohexano-acetona en una relación sólido-líquido preferiblemente 1:5, durante 1-2 horas, con agitación y 80-100°C. La fracción intermedia, que tiene un diámetro entre 0,1 y 1 mm es

directamente recuperable como vidrio. La fracción fina de diámetro inferior a 0,1 mm, que contiene principalmente vidrio, Si, Cd, Te, Zn, Fe, Al, Ag, Ti, se envía a la sección química. La fracción final concentrada en metales pasa por una lixiviación alcalina que proporciona un primer paso a un pH entre 10 y 12 y luego un segundo paso a un pH entre 12 y 14, típicamente pH 12 para aprovechar las diferentes propiedades anfóteras de Te, Zn y Al y de la misma solución para precipitar Fe y Cd, también puede realizarse una lixiviación ácida que se lleva a cabo a un pH de 2 a 5,5, típicamente usando ácido sulfúrico 5 M, operando bajo agitación, a 30-50°C con una relación sólido-líquido 1:1-2:1. Las sucesivas etapas para la recuperación de los metales están previstas hasta llegar a un pH del orden de 10-14. Mientras que Toro propone múltiples etapas para el tratamiento de PV como trituración, pirolisis y lixiviación ácida y básica, Schrijnemakers da a conocer a un método para reciclar de PV mediante tratamiento hidrotérmico, que particularmente comprende de un desmantelamiento en un solo paso del núcleo de células fotovoltaicas de sus componentes, preferiblemente en condiciones subcríticas hidrotermales oxidantes (Audrey SCHRIJNEMAKERS et al., 2018). Cuando los núcleos de las células solares fotovoltaicas se someten a un tratamiento hidrotérmico en condiciones subcríticas oxidantes con ácido nítrico a 150°C u oxígeno 190°C con presión autógena de 0,5 a 2,5 MPa, se produce un desprendimiento del vidrio del núcleo y se generan fragmentos residuales. Simultáneamente, la hoja de aluminio posterior también se está pelando y la despolimerización de la capa encapsulante progresa más rápidamente con agua en condiciones subcríticas. La lámina trasera se elimina totalmente del núcleo del módulo.

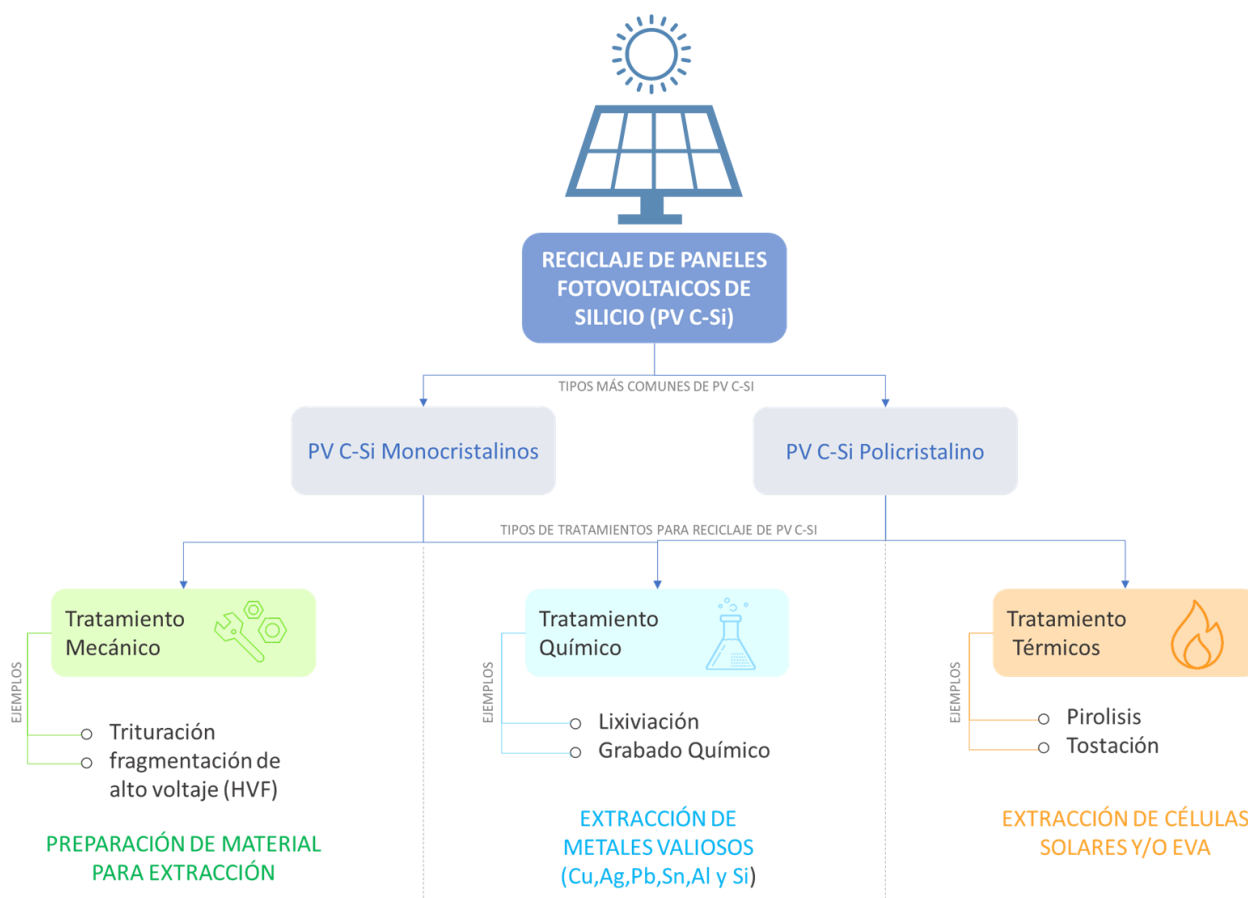


Fig. 6 Mapa conceptual del reciclaje de PV c-Si y sus tipos de tratamientos.



4. Tecnología de Reciclaje de PV en El Mercado

Existen dos caminos para los paneles fotovoltaicos al final de la vida útil, por una parte, hay ciertas empresas que buscan la reutilización de los PV que ya han perdido eficiencia mediante el reacondicionamiento, puesto que esta vía de dar una segunda vida útil a los paneles consta de un proceso simple y de bajo costo. Los paneles de segunda mano pueden ser comercializados a un precio aproximado de \$22 USD, menos de la mitad de lo que costaría un panel nuevo, su valor decrece debido a que el uso disminuye su capacidad para generar electricidad (APTA, n.d.), y aunque el precio de estos paneles de segunda mano es mucho menor a uno nuevo, puede ser que no sea suficiente para merecer su reutilización.

Otro camino que tienen los paneles solares en desuso es mediante el reciclaje de sus componentes, entre ellos el vidrio, Ag, Al, Pb, Cu, Sn y Si, los cuales por diferentes procesos pueden ser extraídos. Ciertas instalaciones de reciclaje utilizan métodos mecánicos como la trituración y molienda para reducir el tamaño del vidrio, las celdas solares y metales sin ser separados la cual denominan como “vidrio de desecho”, estos se pueden utilizar en aplicaciones industriales o de construcción, lamentablemente el valor que se puede adquirir por este producto es bastante bajo, además no está claro que exista un potencial comprador.

Para que el reciclaje de paneles fotovoltaicos sea rentable el proceso debe ser capaz de poder separar los componentes de los PV, puesto que esto ayudara a incrementar el valor de los productos obtenidos por el reciclaje. Es por esto que han surgido diferentes empresas que gestionan residuos electrónicos y que han desarrollado procesos para reciclar los componentes de paneles solares. Veolia asociado con PV CYCLE es una empresa que gestiona los paneles después de su vida útil, esta empresa ubicada en Rousset, Francia, utiliza un proceso de reciclaje que se basa principalmente en la utilización de tratamientos mecánicos para luego separar los componentes de PV por medio de equipos usados para los desechos electrónicos (Veolia, 2022).

Otra empresa Francesa ROSI Solar posee una planta de reciclaje para paneles fotovoltaicos, donde la tecnología desarrollada por esta empresa logra la separación de los materiales encapsulados de los PV, mediante la aplicación de métodos físicos, térmicos y químicos recuperando silicio puro y filamentos metálicos de las celdas, este proceso no utiliza reacciones agresivas, y al ser reducido en costos operativos permite que la planta de reciclaje sea económicamente viable para el reciclaje de paneles fotovoltaicos (Rosi-solar, 2022).

En Alemania para el reciclaje de módulos fotovoltaicos encontramos a la empresa Reiling GmbH & Co. KG, que han desarrollado una solución para el reciclaje del silicio de los módulos solares a escala industrial para su posterior uso en la fabricación de nuevas células solares PERC por medio de métodos físicos que reducen el material y utilizando tecnologías innovadoras separan los elementos del PV (Reiling, 2022). Loser Chemie que también es una empresa alemana, ha desarrollado procesos patentados vinculados con tratamiento mecánico y químico de los PV para el reciclaje de las celdas solares. Al igual que la mayoría de los procesos en Loser Chemie disminuyen el tamaño de material por trituración para luego ser separados por métodos mecánicos. Luego el proceso químico es utilizado para la recuperación de los metales

semiconductores, posteriormente se lleva a cabo la metabolización del aluminio, el cual puede ser utilizado como óxido de aluminio en tratamientos de aguas residuales (Palitzsch & Loser, 2012).

Compton Industriale es una empresa italiana que construye y diseña maquinaria innovadora para el reciclaje de residuos, ésta en colaboración con empresas del sector de reciclaje de RAEE prueba sus prototipos para el tratamiento de residuos. En cuanto al reciclaje de paneles solares esta empresa llevo a cabo la maquina “Solar 4.0”, de forma concreta se realiza una delaminación y recuperación del vidrio con herramientas especiales de acero, lo cual permite la recuperación progresiva de todos los materiales al interior del “sándwich” del PV (Compton-industriale, 2022). NPC Incorp es otra compañía que realiza equipamiento para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, mediante la utilización de rodillos que mueven y sujetan el PV hasta llegar a tener contacto con una hoja de acero calentada a altas temperaturas (180°C – 200°C) que cortan el vidrio y las celdas en solo 40 s, siendo este conocido como el método de “cuchilla caliente” (Npcgroup, 2022).

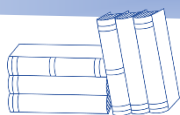


5. Conclusiones

Se puede generalizar que existen principalmente tres tipos de tratamiento para PV: mecánico, químico y térmico, de los cuales son investigados y se mencionan en la gran mayoría de los artículos científicos relacionados con el reciclaje de paneles. Por un lado, los tratamientos mecánicos como la trituración y tamizado se ven como un tratamiento previo a la extracción de metales, puesto que es difícil conseguir la separación óptima de los metales de interés, sin embargo se han estudiado procesos como la fragmentación electrohidráulica (EHF) y la fragmentación de alto voltaje (HVF) que reduce el tamaño de los componentes de PV y los concentra de tal forma que logra una mayor selectividad de los componentes que mejora y facilita el proceso de separación. El tratamiento químico como el grabado químico se basa principalmente en la disolución de EVA por algunos reactivos para recuperar los materiales valiosos en los paneles fotovoltaicos, estos procesos obtienen altos niveles de recuperación, pero el alto consumo de químicos y/o los residuos tanto líquidos como gaseosos producidos durante el tratamiento, dificulta que sean procesos industriales factibles, debido también a que se incrementa la dificultad y el costo de los procesos de reciclaje. El método térmico como la pirolisis puede separar la estructura en capas y facilitar la eliminación del EVA siendo un tratamiento eficiente, aunque este proceso genera otros productos gaseosos indeseables como el ácido acético y metano en los dos picos de descomposición de EVA, los cuales debiesen ser procesados para minimizar su impacto ambiental.

En cuanto al desarrollo tecnológico patentado para el reciclaje de paneles fotovoltaicos se concluye que la gran mayoría presenta la separación mecánica con otro tipo de tratamiento (químico o térmico) como un proceso de reciclaje de PV. Sin embargo, la información obtenida de inventos por patentes es poco precisa. Entre estos inventos se destaca la idea de separación de los componentes de PV por medio de pirolisis y una caída libre del material logrando la separación por diferencia de densidad por medio de un flujo de aire, lo que da a conocer un proceso innovador para la separación de componentes por gravedad, que podría ser llevado a una escala industrial. Otro invento a destacar es el tratamiento hidrotérmico en condiciones subcríticas oxidantes produciendo un desprendimiento de las diferentes capas del PV incluso del EVA, generando fragmentos residuales a temperaturas inferiores a la de la pirolisis de no más de 190°C.

Finalmente, como ya se ha mencionado, la cantidad de paneles fotovoltaicos que estarán en desuso los próximos años es significativa, es por esto que es de suma importancia seguir investigando y patentando métodos para el reciclaje de PV que sean eficaces para la recuperación de recursos y que también sean de bajo impacto ambiental y económico.



6. Referencias

- APTA. (n.d.). *INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA “Procesos químicos verdes-Recuperación de metales, o partes de interés a partir del reciclaje de paneles solares.”*
- Audrey SCHRIJNEMAKERS, Frédéric BOSCHINI, & Rudi CLOOTS. (2018). *METHOD FOR RECYCLING PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS MODULE.*
- Azeumo, M. F., Conte, G., Ippolito, N. M., Medici, F., Piga, L., & Santilli, S. (2019). Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.035>
- Balaji N., C. Raval M., & Saravanan S. (2020). *Review on Metallization in Crystalline Silicon Solar Cells.*
- Compton-industriale, (2022), www.compton-industriale.it (acceso 20-04-22)
- Dias, P. R., Benevit, M. G., & Veit, H. M. (2016). Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. *Waste Management and Research*, 34(3), 235–245. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622812>
- Frisson, L., Lieten, K., Bruton, T., Declercq°, K., Szlufcik°, J., de Moor +, H., Goris, M., Benali ∇, A., Aceves, O., Kapeldreef, S., & Belgium, L. (n.d.). Recent improvements in industrial PV module recycling. In *European Photovoltaic Solar Energy Conference*. <https://www.researchgate.net/publication/228810136>
- IEA. (2015). *Energy technology perspectives 2015: mobilising innovation to accelerate climate action, (Energy technology perspectives 2015).*
- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., & Ryu, H. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 47, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>
- Lee, C. H., Hung, C. E., Tsai, S. L., Popuri, S. R., & Liao, C. H. (2013). Resource recovery of scrap silicon solar battery cell. *Waste Management and Research*, 31(5), 518–524. <https://doi.org/10.1177/0734242X13479433>
- Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. (2022). Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. *Waste Management*, 137, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.024>
- LI XINJUAN, DONG GUOYI, LAI WEIDONG, WU CUIGU, CHEN ZHIJUN, MA CHAO, YUAN BEIHAI, LIU YING, WU MENGMEG, & LI YINGYE. (n.d.). *PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING METHOD AND SYSTEM.*

- Louwen, A., van Sark, W. G. J. H. M., Schropp, R. E. I., Turkenburg, W. C., & Faaij, A. P. C. (2015). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy payback time of current and prospective silicon heterojunction solar cell designs. In *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (Vol. 23, Issue 10, pp. 1406–1428). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/pip.2540>
- Lovato, É. S., Donato, L. M., Lopes, P. P., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2021). Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. *Journal of CO₂ Utilization*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477>
- Nevala, S. M., Hamuyuni, J., Junnila, T., Sirviö, T., Eisert, S., Wilson, B. P., Serna-Guerrero, R., & Lundström, M. (2019). Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling. *Waste Management*, 87, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>
- Npcgroup, (2022), www.npcgroup.net/eng (acceso 27-04-22).
- Padoan, F. C. S. M., Altimari, P., & Pagnanelli, F. (2019). Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. In *Solar Energy* (Vol. 177, pp. 746–761). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003>
- Palitzsch & Loser, (2012). Economic PV waste recycling solutions — Results from R&D and practice. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (pp. 628-631), doi: 10.1109/PVSC.2012.6317689.
- PASIN, A. (2013). *A METHOD AND MACHINE TO ASSIST RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS*.
- Reiling, (2022), www.reiling.de (acceso 25-04-22).
- Rosi-solar, (2022), www.rosi-solar.com (acceso 25-04-22).
- Sah, D., Chitra, Lodhi, K., Kant, C., Srivastava, S. K., & Kumar, S. (2022). Extraction and Analysis of Recovered Silver and Silicon from Laboratory Grade Waste Solar Cells. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01715-6>
- Shin, J., Park, J., & Park, N. (2017). A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 162, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038>
- Song, B. P., Zhang, M. Y., Fan, Y., Jiang, L., Kang, J., Gou, T. T., Zhang, C. L., Yang, N., Zhang, G. J., & Zhou, X. (2020). Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation. *Waste Management*, 101, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.015>
- Song, Q., Zhang, L., Yang, C., & Xu, Z. (2021). Novel Electrodeposition Method for Cu-In-Cd-Ga Sequential Separation from Waste Solar Cell: Mechanism, Application, and Environmental Impact Assessment. *Environmental Science and Technology*, 55(15), 10724–10733. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02496>

Stephanie Weckend, Andreas Wade, & Garvin Heath. (2016). *End of Life Management Solar PV Panels*.

TORO LUIGI, PAGNANELLI FRANCESCA, GRANATA GIUSEPPE, & MOSCARDINI EMANUELA. (2014). *PROCESS FOR TREATING SPENT PHOTOVOLTAIC PANELS*.

Veolia, (2022), www.veolia.es (accesso 30-04-22).

Wang Shiyuan, Wang Zhanyou, Zhou Hailiang, He Shaoxi, & Hou Chao. (2012). *METHOD AND DEVICE FOR DECOMPOSING AND RECYCLING PHOTOVOLTAIC COMPONENT*.

ZAMBON, A., & CERCHIER, P. (2019). *METHOD AND PLANT FOR RECYCLING PHOTOVOLTAIC PANELS*.