



UNEF
Unión Española Fotovoltaica

ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DEL RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS

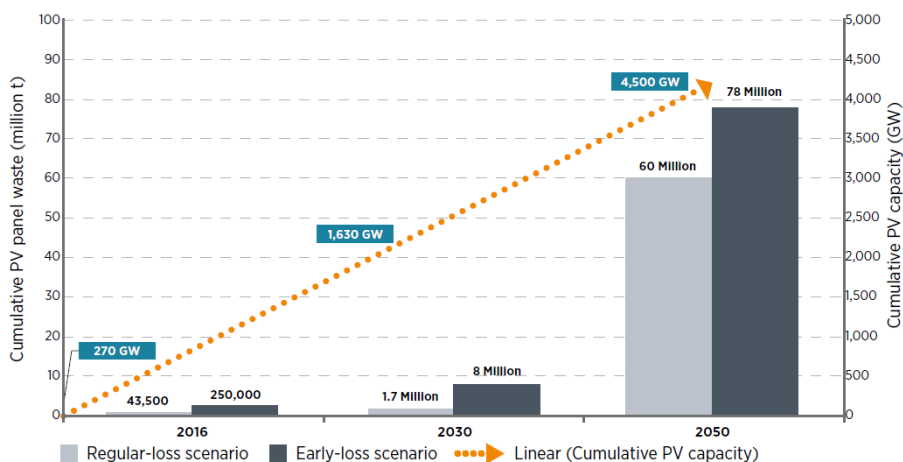
Septiembre 2020

Introducción

La energía fotovoltaica incrementa año tras año su capacidad instalada mundialmente, encadenando cifras cercanas a los 100 GW cada año hasta los 628 GW acumulados a cierre de 2019. España contribuyó el año pasado con casi 5 GW adicionales, que llevaron la capacidad acumulada nacional a valores cercanos a los 10 GW.

Los paneles fotovoltaicos tienen una larga vida útil, de unos 25-30 años, por lo que su reciclaje no ha suscitado un gran interés hasta la fecha. Pero a medida que aumenta el mercado fotovoltaico mundial, también lo hará volumen de residuos de paneles en el futuro. IRENA estimó en 2016 que **habrá hasta 8 millones de toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos en 2030** y 78 millones de toneladas en 2050.

Figura 1 Proyección de residuos de paneles fotovoltaicos a nivel mundial. Fuente: IRENA

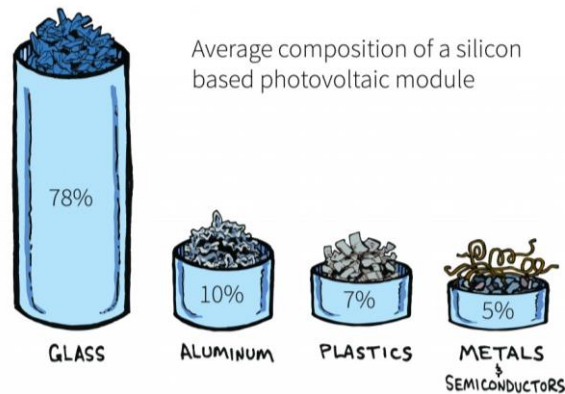


En España, 2,7 GW de la capacidad fotovoltaica total instalada ($\approx 30\%$) se construyó en el año 2008, por lo que **puede esperarse un pico de residuos de paneles en torno a 2028**. Así, el procesamiento de paneles fotovoltaicos presentará pronto un desafío ambiental que ha de atajarse desde el momento presente.

Estado del arte de las tecnologías de reciclaje

El reciclaje de paneles fotovoltaicos es técnicamente viable. De hecho, **los paneles fotovoltaicos presentan altas tasas de reciclado frente a otros residuos electrónicos**. Un módulo fotovoltaico de silicio (el 90% del mercado) está principalmente compuesto de vidrio (78%), aluminio (10%), plásticos (7%) y metales y semiconductores (5%). Simplemente recuperando el marco de aluminio y el vidrio de la parte delantera se habrá reciclado más del 80% de su peso. El coste del proceso de reciclaje se encuentra en el orden de magnitud de los 200 €/tonelada.

Figura 2 Composición media de un módulo fotovoltaico de silicio. Fuente: PVCycle



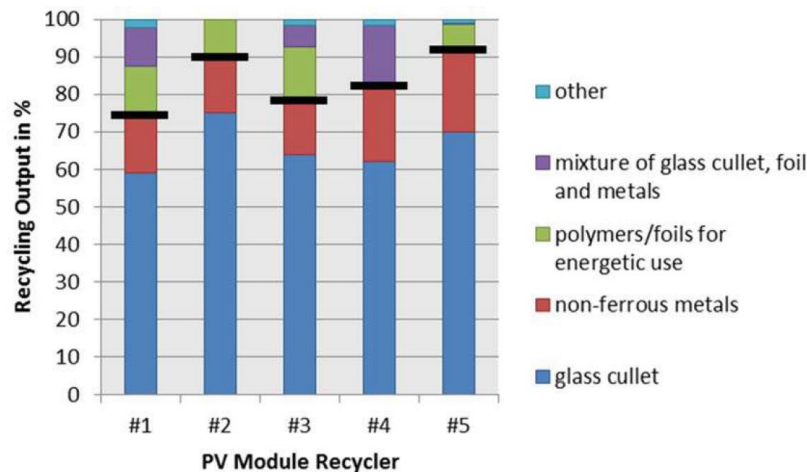
Para el reciclado de los paneles fotovoltaicos de silicio existen distintas alternativas según mayor o menor complejidad del proceso para una mayor recuperación. Recuperar el marco de aluminio y tratar los componentes eléctricos es sencillo. Sin embargo, si se quieren recuperar los materiales de las células (los más valiosos) ha de retirarse el polímero encapsulante, generalmente EVA (Etil Vinil Acetato), proceso más complejo técnicamente por la degradación del mismo durante la vida útil del panel.

En los módulos de silicio los procesos para el reciclaje se dividen por tanto en aquellos que eliminan el encapsulante y aquellos que recuperan los metales de las células. Eliminar el encapsulante de la estructura laminada es uno de los procesos más complejos y se puede hacer mediante procesos térmicos, mecánicos y químicos. Por su lado, la recuperación de metales de las células de silicio se puede lograr mediante métodos químicos como el grabado; otro método viable es un tratamiento en la industria de la refinería de metales.

Para más información pueden consultarse los trabajos del [Programa PVPS](#), un colectivo de investigación sobre tecnología fotovoltaica que colabora con la Agencia Internacional de la Energía y en el que participa UNEFA (en su Task 1). En concreto, pueden consultarse los estudios de la de la [Task 12 PV Sustainability Activities](#). Uno de los estudios de este grupo que permiten obtener una evaluación general del estado del arte del reciclaje de módulos fotovoltaicos es el 'Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe' publicado en 2018.

En este estudio se realizó una petición de información a instalaciones de procesamiento de residuos fotovoltaicos a la que respondieron cinco agentes: dos en Alemania, uno en Bélgica y dos en Italia. Los encuestados 1 a 4 eran instalaciones industriales y el 5 se trataba de una instalación piloto. Pues bien, según muestra este estudio, **estas instalaciones conseguían tasas de reciclaje muy altas entre el 74% y el 95% en peso**, por el reciclado del vidrio y de los metales no ferrosos.

Figura 3 Recuperación de materiales en instalaciones de reciclaje de paneles fotovoltaicos en Europa. Fuente: IEA-PVPS



Respecto a la tecnología empleada, los encuestados 1 a 4 utilizaban **procesos mecánicos** para separar los materiales del módulo incluyendo trituración, tamizado y separación de metales. Por su parte el encuestado 5 empleaba un **proceso termomecánico**.

Como se puede ver en la figura anterior, el principal resultado del proceso de reciclaje es el vidrio. Como sería esperable, **existe un compromiso entre una mayor recuperación de materiales y mayor gasto energético**. El #2 utiliza un proceso mecánico más intensivo para triturar y moler los módulos hasta obtener partículas más finas y permite recuperar más material en comparación con los encuestados #1 #3 y #4. Por su parte, el #5 utiliza un proceso termomecánico para eliminar los polímeros lo que le permite separar los otros componentes a un nivel más alto de pureza.

En segundo lugar en peso en los materiales recuperados, se tienen los **metales**. Estos se recuperan fácilmente a través de procesos mecánicos y se pueden vender a recicladores y fundiciones de metales.

En tercer lugar, se tienen los **polímeros**, una mezcla del encapsulante y materiales de la lámina posterior que los procesos mecánicos no pueden separar en materiales recuperables. Es en esta mezcla en la que se encuentran elementos más valiosos del panel, como la plata.

Sin embargo, estos elementos no se suelen recuperar, y los residuos generalmente se incineran para la recuperación de energía o se depositan en vertederos. La recuperación de estos materiales presenta el principal reto tecnológico para hacer más económicamente rentable el proceso de reciclado (ver *Retos tecnológicos*).

Caso de éxito: La planta de reciclaje de Veolia en Rousset

Debido a que gran parte de los módulos fotovoltaicos no han llegado al final de su vida útil, solo existen unas pocas instalaciones comerciales de reciclaje de módulos fotovoltaicos, la mayoría ubicadas en Europa. El resultado es que, en ocasiones, los módulos se procesan en plantas de tratamiento de residuos eléctricos, que no están específicamente diseñadas para este objetivo.

Desde julio de 2018 Veolia opera la primera planta de Europa específicamente diseñada para el reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. La planta se ubica en Rousset, en la región de Bouches-du-Rhône. Esta planta permite **alcanzar una tasa de recuperación de material del 95% a niveles industriales**. En 2018, la planta logró procesar 1.800 toneladas métricas de materiales y su objetivo es alcanzar las 4.000.

El proceso implementado en la planta ([vídeo](#)) consiste en lo siguiente. Primero se elimina la caja de conexiones, cables y marco de aluminio. Posteriormente se tritura el resto del laminado y se separan las piezas resultantes por tamaño. Esas piezas son una mezcla de vidrio, EVA, la lámina trasera, conexiones de cobre revestidas y células solares.

El vidrio de desecho se utiliza como materia prima en la industria del vidrio, el marco de aluminio se lleva a las refinerías de aluminio y el silicio, el principal componente conductor de los paneles, vuelve a los canales de metales preciosos. Los cables y conectores se Trituran y se venden en forma de granalla de cobre, una mezcla de gránulos que se puede utilizar para fabricar nuevos cables y componentes electrónicos.

Retos tecnológicos

Los procesos más comunes desplegados a escala industrial en instalaciones de reciclaje de paneles se basan en tratamientos mecánicos (corte, trituración y tamizado). Estas soluciones solo con la recuperación del vidrio y el aluminio permiten alcanzar altas tasas de recuperación y cumplir con la normativa europea, que exige un 85%.

A pesar de estas altas tasas de recuperación, los procesos mecánicos empleados hoy en día siguen siendo soluciones de “downcycling”, en las que los materiales recuperados son de baja pureza y de escaso valor. Como se puede ver en la tabla siguiente, el valor económico del panel al final de su vida útil está en el silicio, la plata, el aluminio y el cobre.

Sin embargo, hoy en día, el silicio a menudo no se recicla, sino que se tritura con el vidrio. La plata queda también como residuo y no se recupera. Poder contar con estos

materiales crearía un valor adicional que incentivaría la inversión y el desarrollo de un mercado de servicios de reciclaje.

Figura 4 Composición en peso y en valor económico de un panel fotovoltaico de silicio.

Fuente: CEA

Panel component	Kg/module	% of panel weight	kg/tonne of waste	ASP €/ kg	Potential value per panel	Value € per tonne	% value
Glass	13,22	69,97%	699,74	0,05	0,66	35,0	4,9%
Aluminium	2,50	13,23%	132,33	1,00	2,50	132,3	18,6%
Polymer	1,96	10,35%	103,48	0	0	0,0	0,0%
Silicon	0,61	3,23%	32,29	10,00	6,10	322,9	45,4%
Silver	0,0066	0,03%	0,35	500,00	3,30	174,7	24,6%
Copper	0,201	1,06%	10,64	4,30	0,86	45,7	6,4%
Junction box	0,40	2,12%	21,17	0,02	0,01	0,4	0,1%
Total materials	18,89	100%	1000		13,4	711,0	

Para ello, se están llevando a cabo trabajos de investigación y desarrollo y se están revisando los procesos actuales, sobre todo con financiación de la Comisión Europea, como los proyectos FRELP y ELSI. Por su parte, el Instituto Nacional de Energía Solar (INES) de Francia, está desarrollando un proceso mecánico. Se están explorando multitud de vías para recuperar los metales como el uso de fluidos supercríticos o líquidos iónicos.

Es esencial, por tanto, que se refuerce la investigación en este sentido para alcanzar alternativas de explotación comercial que permitan una mayor explotación posterior de los materiales de los paneles, tanto por una cuestión económica como ambiental.

Marco normativo

El reciclaje de paneles fotovoltaicos es una obligación en la Unión Europea, que ha sido pionera en la regulación de estos residuos. La directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de la que forman parte los paneles (Directiva RAEE 2012/19/CE) requiere un 85% de recolección y un 80% de reciclaje de los materiales presentes en un panel fotovoltaico.

La Directiva RAEE 2012/19 está basada en el concepto de **Responsabilidad Ampliada del Productor**. El 'productor' es la persona física o jurídica que, con independencia de la forma de venta fabriquen y vendan aparatos eléctricos y electrónicos y/o pilas con marcas propias, pongan en el mercado con marcas propias los productos fabricados por terceros y los que los realicen adquisiciones comunitarias o importen de terceros países.

Es decir, este 'productor' puede ser tanto el propio fabricante del panel, como su distribuidor, el EPC o la empresa instaladora si en el contrato de compra de los equipos se ha incluido la cesión de la responsabilidad.

Según la directiva europea los ‘productores’ están obligados a:

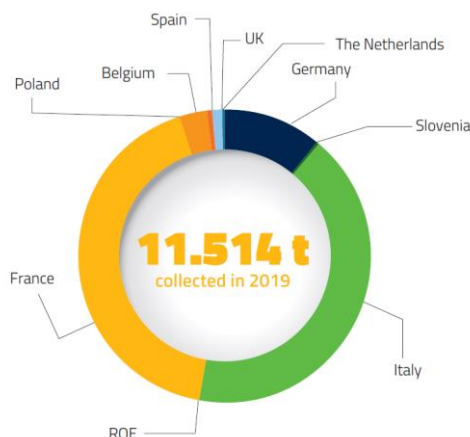
- Diseñar y producir los aparatos de forma que no contengan sustancias peligrosas en cantidades superiores a las determinadas y que se facilite su desmontaje, reparación y su reutilización y reciclaje.
- Adoptar las medidas necesarias para que los residuos de productos por él puestos en el mercado sean recogidos de forma selectiva y tengan una correcta gestión ambiental, mediante marcado, información a su canal de venta, colaboración con el sistema de recogida, etc.
- Financiar los costes de dicha gestión.
- Inscribirse en los Registros Nacionales de Productores de Aparatos Eléctricos y Electrónicos y de Pilas y Acumuladores gestionados por el Ministerio de Industria, denominados RII-AEE y RII-RPA.
- Declarar a dichos Registros de forma trimestral información relativa a las cantidades de productos puestas en el mercado nacional.

Estas obligaciones se pueden cumplir individualmente o de forma colectiva a través de un SCdeRAP (Sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada del Productor).

En Europa contamos con la **asociación PVCycle**, constituida por fabricantes del sector fotovoltaico, que se encarga de crear SCdeRAP propios o colaborar con los SCdeRAP presentes en los distintos países para la recogida y reciclaje de todo tipo de módulos fotovoltaicos. A través de PVCycle se reciclaron **11.514 toneladas de paneles en 2019**, sobre todo provenientes de Francia e Italia.

Figura 5 Desglose por país de los paneles fotovoltaicos procesados por PVCycle.

Fuente: PVCycle



En España la Directiva RAEE 2012/19/CE se traspuso mediante el *Real Decreto 110/2015 de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*, incluyendo los paneles fotovoltaicos como una **categoría específica** (categoría 7) entre los distintos residuos electrónicos. El RD impone en España las obligaciones citadas

antes a fabricantes, importadores e instaladores a los que se les ha cedido la responsabilidad.

Instalaciones de reciclaje de paneles fotovoltaicos en España

En nuestro país el procesado de paneles fotovoltaicos se puede realizar a través de varios SCdeRAP. Uno de ellos es Ecoasimelec, cuya administradora es Recyclia, asociada de PVCycle en España.

Sin embargo, existe cierto desconocimiento de estas obligaciones en el sector y el grado de adscripción a estos sistemas es aún bajo en el sector. Como alternativa, los 'productores' pueden cumplir con las obligaciones de procesado de paneles fotovoltaicos a través de sistemas individuales.

Debido a que pocos paneles fotovoltaicos llegan hoy en día al fin de su vida útil y las bajas tasas de reciclaje, la cantidad de paneles fotovoltaicos procesados son insignificantes en comparación con la cantidad de otros RAEE. Por ello no existen en España plantas de tratamiento específicas para paneles, que son reciclados en plantas de otros RAEE o en instalaciones europeas.

Asimismo, debido al bajo volumen de residuos que reciben las instalaciones, los recicladores actuales de RAEE no han desarrollado el *know-how* para procesar estos nuevos residuos ni han establecido procesos automatizados.

Conclusiones

- IRENA estimó en 2016 que habrá hasta 8 millones de toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos en 2030 a nivel mundial. En España puede esperarse un pico de residuos de paneles en torno al año 2028.
- El reciclaje de paneles fotovoltaicos es técnicamente viable y tiene un coste en el orden de los 200 €/tonelada. Los métodos reciclaje más comunes se basan en procesos mecánicos que permiten recuperar con facilidad el aluminio y el vidrio (alcanzando una tasa de reciclaje del orden del 80% en peso del panel).
- En los próximos años, un mayor volumen de paneles llegando al final de su vida útil impulsará la implementación de más instalaciones específicas para el procesado de estos residuos. Se espera también la introducción de mayor grado de automatización. Ambos efectos traerán una reducción de los costes.
- Existen pocas instalaciones de reciclado de paneles y la mayoría están en Europa. En la planta de Veolia en Francia, la primera específicamente diseñada para el reciclado de paneles, se procesaron 4.000 toneladas en 2018 alcanzando tasas de reciclado del 95%, muy por encima de otros residuos electrónicos.

- Se están llevando a cabo proyectos de I+D que buscan recuperar los elementos más valiosos del panel, como el silicio y la plata, cuya obtención es más compleja debido a la degradación del encapsulante de vinilo.
- La regulación europea (Directiva RAEE 2002/19/CE) obliga al procesado de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil mediante la figura de la responsabilidad ampliada del productor. El 'productor' es el fabricante o importador del panel, pero puede trasladar la obligación aguas abajo hacia el instalador o el EPC.
- En Europa la asociación PVCycle, formada por fabricantes del sector fotovoltaico, procesó 11.500 toneladas de paneles en 2019, principalmente de Francia y Alemania.
- En España se ha transpuesto esta Directiva mediante el RD 110/2015 haciendo obligatorio el procesado de paneles fotovoltaicos en España con una tasa de recuperación mínima del 80%.
- En España existe varios sistemas colectivos (SCdeCRAP) que permiten el procesado de paneles fotovoltaicos y el cumplimiento de estas obligaciones. Sin embargo, existe aún poca concienciación en el sector fotovoltaico sobre la existencia de esta obligación, por lo que el grado de reciclaje aún es bajo.
- Debido a ello, no se genera un volumen de residuos fotovoltaicos suficiente para motivar una inversión en plantas de procesado específicas, por lo que el procesado se hace en instalaciones de gestión de otros RAEE.
