

Reciclaje de paneles fotovoltaicos en España: obligación legal, reto logístico y oportunidad industrial

Alejandro Labanda

Director de Regulación y Estudios. Unión Española Fotovoltaica (UNEF).



Fuente: PVCycle.

El pasado año 2020 la Agencia Internacional de la Energía [1] proclamó a la energía solar fotovoltaica como la nueva reina del mercado eléctrico a nivel mundial. Apoyándose en su carácter renovable, su bajo coste y su reducido impacto ambiental, la Agencia sitúa, en todos sus escenarios, a la fotovoltaica como la tecnología más instalada en las próximas décadas.

Una de las fortalezas de esta tecnología es el reducido impacto ambiental de sus instalaciones. Para que este reducido impacto sea completo, debe asegurarse la correcta gestión del final del ciclo de vida de sus componentes. Los

módulos fotovoltaicos tienen una vida útil de aproximadamente 25-30 años por lo que para los países pioneros en esta tecnología, como España, la primera generación de parques solares (instalados en la década de los 2000) llegará pronto al final de la vida útil.

Es por ello que el reciclaje de paneles fotovoltaicos está atrayendo un creciente interés por parte tanto de empresas como de tomadores de decisión y del público general, que exige a las energías renovables el cumplimiento estricto de los máximos estándares ambientales y de economía circular.

La energía fotovoltaica deberá enfrentarse en esta década a la gestión del final de vida útil de la primera generación de plantas solares. España, como uno de los países pioneros en el desarrollo de la energía solar fotovoltaica, será también uno de los primeros países en tener que enfrentar el reto de los residuos electrónicos fotovoltaicos

Proyección del residuo fotovoltaico en España

Como punto de partida para analizar este reto, debe comenzarse estimando cuál es la magnitud del residuo fotovoltaico que se generará en los próximos años. Para este ejercicio teórico se emplean generalmente dos modelos que deben interpretarse como dos partes compatibles con la misma realidad, que arrojan un rango en el que se moverán los residuos generados.

- *Early loss*, o pérdida temprana, que asume que hay una fracción de los módulos que llegan al final de su vida útil de forma prematura, arrojando un crecimiento lineal de los residuos fotovoltaicos.
- *Regular loss*, o pérdida estándar, que asume que los módulos se degradan siguiendo una curva de tipo 'normal' centrada en el final de la vida útil, arrojando un pico cuya aparición depende del año de instalación.

A nivel mundial, el Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía (IEA PVPS) e IRENA [2] estimaron el residuo proveniente de módulos fotovoltaicos hasta 2030 en un rango de 1,7 millones de toneladas (*early loss*) y 8 millones de toneladas (*regular loss*) acumuladas.

España, como país pionero en el despliegue fotovoltaico, será también uno de los primeros países en tener que enfrentar el reto de los residuos electrónicos fotovoltaicos. En 2008 nuestro país fue el mercado líder europeo, con la introducción de 2,7 GW, pero a ese *boom* le siguieron años con cifras reducidas hasta llegar a una fase de moratoria, tendencia que se rompió en el año 2019, cuando nuestro país volvió a ser líder europeo once años después.

La previsión más exhaustiva realizada hasta la fecha sobre la generación de residuos fotovoltaicos en España se basa en los cálculos de J.D. Santos y M.C. Alonso-García del Departamento de Energías Renovables del CIEMAT que arrojan una generación anual de residuos fotovoltaicos del orden de 10 000 toneladas entre 2022 y 2027 para escenarios de degradación conservadores [3].

No obstante, en este estudio el volumen anual de residuos fotovoltaicos muestra diferencias significativas en función de los escenarios considerados sobre la durabilidad de las plantas instaladas el año 2008. Si asumimos que la degradación de estas plantas seguirá un modelo *regular loss*, para un tiempo de vida estimado de 20 años, se generaría un pico de unas 22 000 toneladas de paneles en 2028.



Figura 1. Potencia instalada solar fotovoltaica en España. Fuente: REE.

Como apuntan los autores de este estudio, un comportamiento tipo *regular loss*, podría suponer un reto logístico para una potencial industria de reciclaje nacional, pues de un pico muy acusado se pasará a volúmenes muy inferiores hasta que se comiencen a gestionar los módulos de las plantas actuales. Así, la visibilidad sobre la generación de residuos fotovoltaicos en los próximos años se convierte en un asunto clave pues permitirá discernir cómo se están comportando los módulos instalados en España durante el boom solar de 2008.

Alternativas al reciclaje: reducir y reutilizar

Como se ha mencionado, en paralelo a un despliegue de nueva capacidad sin precedentes en los próximos años, la energía fotovoltaica se deberá enfrentar al reto de la gestión

del final de vida útil de las plantas de generaciones anteriores. No obstante, la regla de las tres erres ‘3R’ (reducir, reutilizar y reciclar) para disminuir el volumen de residuos también se puede aplicar a los paneles fotovoltaicos. Antes de llegar al reciclaje, existen alternativas que permiten reducir el uso de materiales y el ritmo de degradación de los módulos.

En primer lugar, los fabricantes fotovoltaicos llevan años reduciendo la cantidad de materiales utilizados para fabricar un panel [3]. Aunque la composición de los distintos materiales sigue siendo similar a la de generaciones anteriores, los paneles actuales han aumentado significativamente la ratio de potencia por peso, es decir generan mucha más energía para el mismo peso. Esto supone mayor eficiencia en el uso de materiales, menor impacto ambiental y menor residuo futuro.

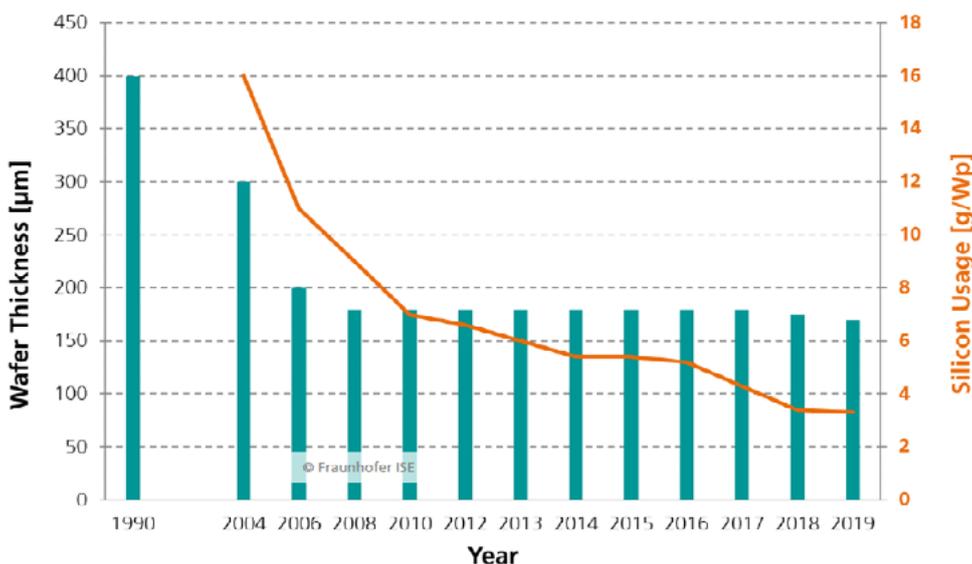


Figura 2. Reducción del uso de materiales en un panel fotovoltaico de silicio. Fuente: Fraunhofer.

La curva de aprendizaje en la reducción de costes que ha alcanzado la energía fotovoltaica en la última década (los módulos son hoy un 90% más baratos que hace diez años) también se apoya en un menor uso de materiales gracias a las mejoras en la producción, la sustitución de materiales y tecnologías de fabricación más eficientes.

En particular, los fabricantes se centran en la reducción de uso de los materiales llamados críticos. Aunque de forma general la disponibilidad de materiales no es una preocupación para este sector, los materiales críticos sí merecen una atención especial. Esta es, de hecho, una de las ra-

zones para impulsar un sector industrial de reciclaje fotovoltaico, pues la recuperación de materiales críticos de paneles reciclados al fin de su vida útil puede servir como alternativa para el aprovisionamiento de estos materiales en el futuro (aluminio, cobre, plata y estaño).

Respecto a la reutilización, los paneles reparados también se pueden revender como repuestos o como paneles usados a un precio de mercado reducido, y los paneles o componentes parcialmente reparados pueden venderse en el mercado de segunda mano.

Estado del arte de las tecnologías de reciclaje de módulos fotovoltaicos

Aunque no es muy conocido para el público general (e incluso entre profesionales más especializados), el reciclaje de paneles fotovoltaicos es una operación sencilla desde un punto de vista técnico. De hecho, el reciclado de paneles alcanza una tasa de recuperación más alta que otros residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de uso convencional.

La composición de un módulo fotovoltaico de silicio (el 95% del mercado) es principalmente vidrio (78%) y alu-

minio (10%), ambos elementos fácilmente reciclables, y en menor cantidad se encuentran plásticos (7%) y metales y semiconductores (5%). Así, simplemente recuperando el marco de aluminio y el vidrio de la parte delantera y procesándolos adecuadamente, se consigue reciclar más del 80% en peso del panel.

El elemento determinante en este proceso es la técnica empleada para la recuperación del vidrio y de los materiales presentes en las células fotovoltaicas (donde se encuentran los compuestos de mayor valor). Actualmente, las instalaciones industriales de reciclaje de paneles em-

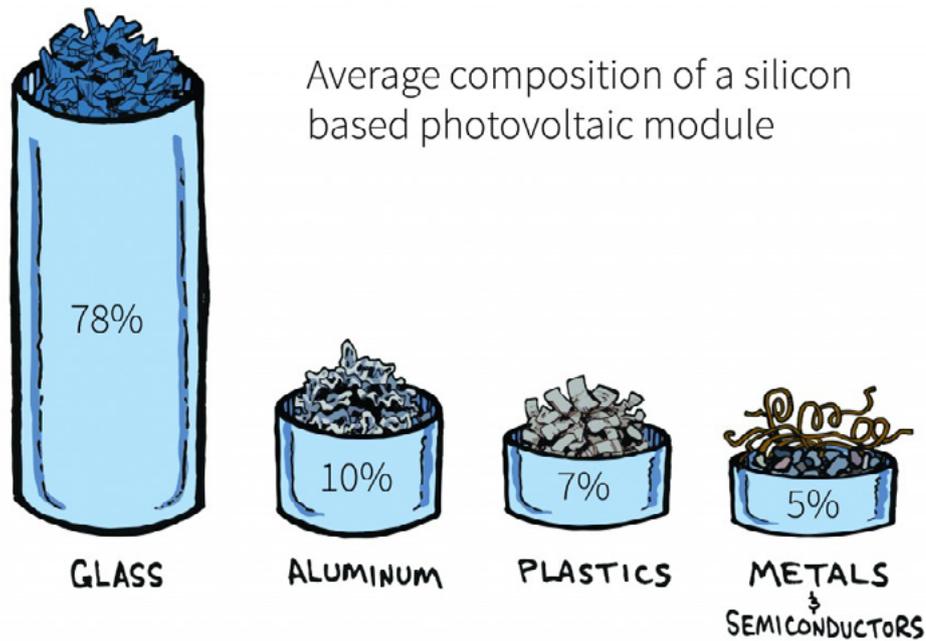


Figura 3. Composición media de un módulo fotovoltaico de silicio. Fuente: PVCycle.

La generación de residuos de paneles fotovoltaicos en España estará influida por la evolución de la durabilidad de las plantas instaladas el año 2008, que suman 2,7 GW. Si estos paneles presentan un tiempo de vida del orden de veinte años, se podría generar un pico de residuos de unas 22 000 toneladas en 2028

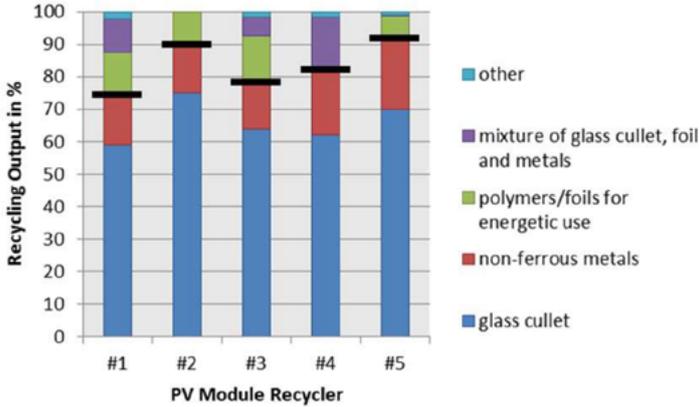


Figura 4. Recuperación de materiales en instalaciones de reciclaje de paneles fotovoltaicos en Europa. Fuente: IEA-PVPS.

plean en su mayoría tratamientos mecánicos (corte, trituración y tamizado) para tratar el vidrio. Estas soluciones permiten alcanzar altas tasas de recuperación y cumplir con la normativa europea, que exige un 85%, pero los materiales de alto valor (que representan bajos porcentajes en masa) no se recuperan.

Para tener una perspectiva general sobre las tecnologías y métodos empleados para el reciclaje de paneles, la Task12 del Programa PVPS de la Agencia Internacional de la Energía elaboró en 2018 un estudio [7] en el que realizó una petición de información a distintas instalaciones de procesado de residuos fotovoltaicos a la que respondieron cinco agentes: dos en Alemania, uno en Bélgica y dos en Italia.

Los resultados de este estudio muestran que las instalaciones industriales para el reciclado de paneles conse-

guían tasas de reciclaje muy altas entre el 74% y el 95% en peso. Los encuestados #1 al #4, instalaciones industriales, utilizaban procesos mecánicos, separando los materiales del módulo mediante trituración y tamizado. Mientras que el #5, una instalación piloto, estaba probando la combinación de procesos térmicos y mecánicos.

Como se puede ver en la Figura 4, debido a los procesos mecánicos empleados por estas instalaciones industriales, aunque se consiguen alcanzar altas tasas de recuperación en peso, la recuperación de materiales se limita al vidrio y los metales no ferrosos. Estos procesos no permiten extraer los polímeros encapsulantes usados para proteger a las células fotovoltaicas, por lo que no recuperan los elementos de alto valor económico presentes en ellas. Es por esto que la innovación y el desarrollo se centra en la eliminación del encapsulante con el objetivo de recuperar estos compuestos de mayor valor y aumentar la rentabilidad económica del reciclado.

Retos tecnológicos del reciclado y tendencias de I+D

Siguiendo el objetivo de recuperar el mayor porcentaje en peso del panel, la investigación en reciclaje de paneles se centró en la recuperación de componentes de alto peso específico a bajos costes. Como resultado, aunque se han alcanzado altas tasas de recuperación, éstas se apoyan en el vidrio y el aluminio. No obstante, el valor económico del panel al final de su vida útil no está en el vidrio, que es un material abundante, sino 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.

¿Cómo funciona una instalación industrial de reciclaje de paneles?

Debido a que actualmente la cantidad de paneles que llega al final de su vida útil es baja, estos se procesan en plantas de tratamiento de otros residuos eléctricos y electrónicos. No obstante, en 2018 se puso en funcionamiento la primera planta de Europa exclusivamente diseñada para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, logrando procesar ese año 1800 toneladas y con capacidad para tratar hasta 4000.

La planta, construida y operada por Veolia está ubicada en Rousset (Bouches-du-Rhône, Francia) y es capaz de recuperar el 95% en peso de los paneles. En el proceso de reciclaje ([vídeo](#)) primero se elimina la caja de conexiones eléctricas, los cables y el marco de aluminio que se sitúa alrededor del vidrio. Tras ello, se tritura el vidrio en varias etapas hasta alcanzar finos granos que son una mezcla de vidrio, el encapsulante, la lámina trasera del panel y las células solares. Los materiales recuperados (vidrio, aluminio, y cables y componentes electrónicos) se venden como materias primas a distintas industrias fabricantes.

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	

Figura 5 Composición en peso y en valor económico de un panel fotovoltaico de silicio. Fuente: CEA

Como se ha visto, los procesos empleados actualmente se basan en soluciones mecánicas tipo *downcycling* en las que se acaban descartando los materiales más valiosos. Para recuperar estos materiales ha de retirarse el polímero encapsulante (generalmente Etil Vinil Acetato o EVA, vinilo transparente que se adhiere a las células fotovoltaicas para protegerlas), proceso complejo por la degradación del mismo durante la vida útil del panel.

Por ello, las tendencias tecnológicas actuales se centran en la eliminación del encapsulante para separar el vidrio de los materiales de las células y recuperar los metales presentes en éstas y los electrodos de silicio. Sin embargo, eliminar el encapsulante es el proceso más difícil en el reciclaje de módulos, estudiándose actualmente métodos térmicos mejorados, así como procesos mecánicos y químicos.

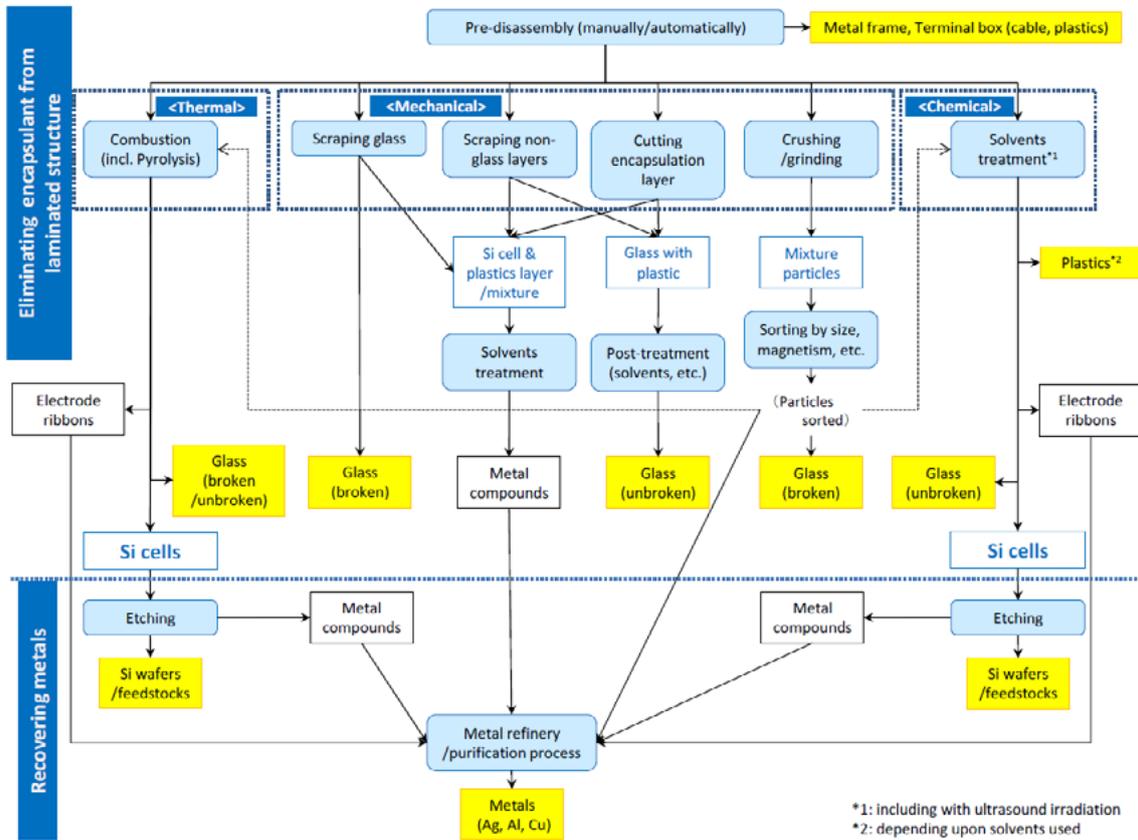


Figura 6. Alternativas para el reciclaje de módulos fotovoltaicos de silicio. Fuente: IEA PVPS.

La recuperación de materiales valiosos de bajo peso es clave para que se pueda generar un incentivo económico a aumentar las tasas de recuperación y reciclaje en el futuro. Además, algunos de estos materiales se consideran materias primas críticas (CRM) para la economía europea, debido a su importancia en la cadena de valor de las tecnologías limpias.

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: Reciclar es una obligación en España para todos

La Unión Europea fue pionera en la aprobación de obligaciones normativas de reciclado de paneles fotovoltaicos. En 2012 se aprobó la Directiva 2012/19 sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) incluyendo en estos residuos a los paneles fotovoltaicos y extendiendo a los mismos un objetivo de 85% de recolección y un 80% de reciclaje de sus materiales.

La Directiva RAEE 2012/19 se basa en el concepto de Responsabilidad Ampliada del Productor que es la persona física o jurídica que fabrique y venda aparatos eléctricos y electrónicos, ponga en el mercado productos fabricados por terceros y el que realice adquisiciones comunitarias o importe de terceros países. Aplicándolo a los paneles fotovoltaicos, este 'productor' pueden ser todas las empresas presentes en la cadena: el fabricante del panel, su distribuidora, la promotora de la planta, la EPCista o la empresa instaladora de autoconsumo.

En España, la Directiva se traspuso mediante el Real Decreto 110/2015, que inicialmente incluyó los paneles dentro de la categoría de dispositivos electrónicos de consumo, pero desde 2019 los clasificó bajo una categoría específica. El Real Decreto define también los requisitos mínimos de las instalaciones de reciclaje de residuos fotovoltaicos, así como el procedimiento para gestionar los residuos fotovoltaicos de cada tecnología.

En definitiva, por aplicación del RD 110/2015, los 'productores' (fabricantes, distribuidores, instaladores, EPCistas, promotores) de paneles fotovoltaicos en España tienen las siguientes obligaciones:

- 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.
- Adoptar las medidas necesarias para que los paneles sean recogidos al final de su vida útil y tengan una correcta gestión ambiental, financiando los costes de dicha gestión.

Aunque aún no se declara tanta capacidad fotovoltaica como se instala, en los últimos años el conocimiento de estas obligaciones ha aumentado considerablemente y con él la adscripción de las empresas del sector fotovoltaico a los Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCdeRAP) que se aseguran del cumplimiento de las mismas.

En Europa la asociación PVCycle, recicló 11 514 toneladas de paneles en 2019. En España, se cuenta con Ecoasimeltec, y la Fundación Ecolec que también realizan esta función. Como alternativa, los 'productores' pueden cumplir con las obligaciones de procesado de paneles fotovoltaicos a través de sistemas individuales.

Oportunidad social y geoestratégica de una industria nacional de reciclaje

Actualmente, las cantidades de residuos fotovoltaicos son reducidas y los procesos de reciclaje existentes no permiten extraer los materiales de mayor valor, por lo que no hay un fuerte incentivo económico a crear plantas específicas de reciclaje de paneles fotovoltaicos. Así, por el momento, los paneles fotovoltaicos se procesan en plantas de reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Las técnicas actuales no permiten recuperar materiales presentes en el panel que tienen un alto valor y son críticos para la economía europea como el silicio y la plata. Por ello, la innovación se centra en la recuperación de estos elementos cuya obtención es más compleja

Sin embargo, con el volumen de residuos fotovoltaicos a procesar en los próximos años, la inversión en plantas específicas se plantea como una cuestión necesaria. Estas instalaciones, al margen de sus beneficios ambientales, tienen un gran potencial de creación de un modelo económico circular en el sector fotovoltaico. Las empresas no son ajenas a esta cuestión y han presentado varias propuestas a la manifestación de interés de economía circular del Ministerio para la Transición Ecológica de plantas de reciclaje de paneles.

Hay que considerar que los paneles fotovoltaicos ya instalados acumulan una gran cantidad de materias primas que, una vez recuperadas, pueden introducirse de nuevo en la economía para fabricar nuevos paneles aumentando así la seguridad del suministro fotovoltaico futuro. Dicho de otra forma, el crecimiento de los volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos a gestionar en los próximos años, aunque será un considerable reto logístico, supone a la vez una oportunidad industrial y geoestratégica.

La recuperación de los materiales presentes en los paneles fotovoltaicos serviría para crear un mercado secundario de materiales críticos. Esta cuestión no es desdeñable pues la seguridad en el aprovisionamiento de materiales críticos es un aspecto de crucial importancia geopolítica en la transición energética, especialmente en países o regiones, como la Unión Europea, que dependen en gran medida de las importaciones.

Además, en un contexto en el que las energías renovables tienen que construir los términos del contrato social para su aceptación como nuevas energías convencionales, no hay que desdeñar el potencial impacto social de una in-

Además de un reto logístico, el reciclaje de paneles fotovoltaicos en España es una oportunidad para desarrollar un sector industrial con oportunidades de empleo nacional en distintos niveles de capacitación que fortalecería la posición geoestratégica de nuestro país en el aprovisionamiento de materiales críticos

dustria nacional de reciclaje de paneles. El reciclaje de paneles es una actividad industrial que ofrece oportunidades de empleo nacional con distintos niveles de capacitación. ✿

Bibliografía

- [1] World Energy Outlook 2020, International Energy Agency, 2020
- [2] End-of-life Management Solar Photovoltaic Panels. IRENA-IEA PVPS, 2016
- [3] Photovoltaics report, 2020, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2020
- [4] Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050, J.D. Santos, M.C. Alonso-García, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), 2018
- [5] Update of the projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050, J.D. Santos*, M.C. Alonso-García, N. Vela, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), 2019

- [6] End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies, International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Program, 2018
- [7] Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe, International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Program, 2018
- [8] Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels, Latunussa C, Mancini L, Blengini G, Ardente F, Pennington, European Union Joint Research Center Technical Reports, 2016
- [9] Market analysis and business models for a circular economy in PV, 2017, Robert Thomas CEA TECH; Marie Charlotte Hoffman, Projektkompetenz; David Pelletier, CEA TECH INES.