

## **CIRCULARIDAD DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE EL RECICLAJE, LA REPARACIÓN Y LA REUTILIZACIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. PROYECTO FOTOVOL3R**

**Alonso-García M.C.\*, García-Rosillo F.\*, Gómez R.\*\*\*, Garraín D.\*, Sala R.\*\*\*, Muñoz-García M.A.\*\*\*\*, Nieto M.B.\*, Mejuto E.\*, Germán S.\*\*\***

\* Departamento de Energía. CIEMAT. Avenida Complutense 40, 28040 Madrid. España.  
carmen.alonso@ciemat.es

\*\* Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Plaza San Juan de la Cruz, 10. Madrid. 28071. España. Bzn-raee@miteco.es

\*\*\* Departamento de Medioambiente. CISOT-CIEMAT, Plaça del Coneixement s/n, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, (Barcelona) España, roser.sala@ciemat.es

\*\*\*\* ETSIAAB, LPF-TAGRALIA. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta de Hierro, nº 2 ,28040 Madrid. miguelangel.munoz@upm.es

### **RESUMEN/RESUMO**

Este artículo describe el proyecto FOTOVOL3R, presentando las primeras tareas realizadas en el marco del proyecto, financiado por la convocatoria Retos 2020 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. El proyecto tiene el objetivo de contribuir a la inclusión de los sistemas fotovoltaicos en la economía circular mediante el análisis de las opciones de fin de vida para los módulos, considerando escenarios de reciclaje, reparación y reutilización con especial atención a los dos últimos. En dichos escenarios, además de las tareas teóricas y experimentales se contempla el análisis del ciclo de vida y, adicionalmente, se incluye un paquete de trabajo dedicado exclusivamente a abordar la dimensión psicosocial de la energía FV. El artículo presenta el contexto que ha fomentado la creación del proyecto, la actual gestión del reciclaje de los módulos FV en España, los primeros estudios relacionados con la opción de reparación de los módulos y el fundamento del análisis del impacto ambiental y las medidas de circularidad para los módulos fotovoltaicos.

**PALABRAS CLAVE/PALAVRAS-CHAVE:** Energía fotovoltaica, Fin de Vida, Reciclaje, Reparación, Reutilización, Circularidad.

### **ABSTRACT**

This paper describes the FOTOVOL3R project, presenting the first tasks carried out within the framework of the project, funded by the call Retos 2020 of Spanish the Ministry of Science and Innovation. The project aims to contribute to the inclusion of photovoltaic systems in the circular economy by analyzing the end-of-life options for modules, considering recycling, repair and reuse scenarios with special attention to the last two. In these scenarios, in addition to the theoretical and experimental tasks, the life cycle analysis is also performed. Furthermore, a work package dedicated exclusively to addressing the psychosocial dimension of PV energy is included. The paper presents the context that has fostered the creation of the project, the current management of the recycling of PV modules in Spain, the first studies related to the repair option of the modules and the basis of the environmental impact analysis and circularity measures for photovoltaic modules

**KEYWORDS:** Photovoltaic Energy, End of Life, Recycling, Repair, Reuse, Circularity.

## INTRODUCCIÓN/INTRODUÇÃO

La energía solar fotovoltaica (FV) se ha demostrado como una fuente energética barata, fiable y segura, con un incremento exponencial de su capacidad acumulada en los últimos años. Esta progresión tiene visos de continuidad hasta lograr una mayor participación en el mix energético en aras de la descarbonización de la economía y reducción de los gases de efecto invernadero. En noviembre de 2018 la Comisión Europea presentó “Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra” (COM 773 final 2018). Este documento proporciona la estrategia europea para lograr cero emisiones netas de gases de efecto invernadero de aquí a 2050, al tiempo que se mejora la competitividad de la economía y la industria de la UE en los mercados mundiales. En concreto, la Comisión Europea propuso siete grandes bloques estratégicos para apoyar esta transición, entre ellos, la necesidad de maximizar el despliegue de las energías renovables y el uso de la electricidad para descarbonizar completamente el suministro energético de Europa. En la misma línea, en 2019 se publica el Pacto Verde Europeo (COM 640 final 2019), una nueva estrategia de crecimiento para la UE en la que no haya emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050 y en la que el crecimiento económico se desacople del uso de los recursos. Esta publicación reafirma la ambición de la Comisión Europea de hacer de Europa el primer continente climáticamente neutro en 2050. Finalmente, en 2021 se publicó la Legislación Europea del Clima (Reglamento (UE) 2021/1119), que materializa los objetivos del pacto verde europeo en su búsqueda de la neutralidad climática. La consecución de estos objetivos en los países Europeos se presentan en los Planes Nacionales de Energía y Clima (National Energy and Climate Plans) y las Estrategias a Largo Plazo (National Long Term Strategies), que establecen los escenarios de crecimiento para 2030 y 2050 respectivamente.

Estos objetivos están sujetos invariablemente al aumento de la capacidad fotovoltaica instalada. Según publicaciones recientes (Solar Power Europe 2021) la capacidad fotovoltaica acumulada en la Europa de los 27 podría llegar a los 672 GW en 2030 considerando un escenario de crecimiento medio, y a los 870 GW en 2030 si se considera la trayectoria que lograría la neutralidad climática en 2050.

Alineado con este escenario, es previsible la generación de residuo fotovoltaico cuando los módulos lleguen al final de su vida útil. La adecuada gestión de los mismos para que puedan ser incluidos en la economía circular exige la creación de canales de recogida, tratamiento, revalorización y reutilización, al tiempo que necesita de la generación de conocimiento científico en toda la cadena de valor. En este contexto está planteado el proyecto FOTOVOL3R. Su objetivo es contribuir a la inclusión de los sistemas FV en la economía circular, y a hacer esta fuente de energía más sostenible. Aumentar la sostenibilidad de un producto implica, no solo encontrar formas de gestionar y valorizar sus residuos, sino también aumentar la aceptación del producto, reducir la cantidad de residuos y evitar nuevas generaciones residuos, y dar una segunda vida al producto. Para los módulos fotovoltaicos, esto implicaría 1) la detección de módulos defectuosos en las plantas, 2) el análisis de los mismos con el fin de comprobar si han llegado al final de su vida útil o si es posible realizar reparaciones que los devuelvan al mercado, 3) la reparación en los casos en que sea posible y verificación de la fiabilidad de los módulos reparados y 4) el tratamiento de los residuos de los módulos que realmente han llegado al final de su vida útil.

El proyecto FOTOVOL3R analiza las opciones de fin de vida para los módulos, considerando el reciclaje, la reparación y la reutilización, teniendo en cuenta el panorama fotovoltaico en España, las tendencias de crecimiento en potencia instalada, y la previsión de generación de residuo a futuro. Además, contempla el análisis del ciclo de vida de los diferentes escenarios propuestos en el proyecto para el tratamiento de los módulos fotovoltaicos al final de su vida, e incluye un paquete de trabajo dedicado exclusivamente a abordar la dimensión psicosocial de la energía FV y, en concreto, de los módulos FV. La Fig.1 muestra la representación esquemática del proyecto.



Fig.1 Esquema del proyecto FOTOVOL3R.

## FIN DE VIDA DE LOS MÓDULOS

Se considera que un producto ha alcanzado el fin de su vida cuando es incapaz de operar en las condiciones para las que está diseñado, o se ha perdido su integridad. Para el caso de los módulos fotovoltaicos esto implicaría que no suministrarán ninguna electricidad, o que hubieran perdido su integridad física, mecánica o eléctrica. Sin embargo, salvo averías debidas a eventos extremos como incendios, grandes tormentas u otras casuísticas, es difícil que un módulo fotovoltaico llegue a la pérdida total de su potencia, y por tanto al fin de su vida funcional. Una buena compilación de los principales defectos que pueden encontrarse en los módulos fotovoltaicos cuando están operando, y los factores que influyen en los mismos puede encontrarse en el documento de la Agencia Internacional de la Energía (Kontges, 2014).

Además de la pérdida total de su integridad o funcionalidad, los módulos FV van sufriendo una serie de degradaciones y pequeñas pérdidas de potencia desde el momento de su instalación. Llega un momento en que los efectos causados por esta degradación hacen que ya no sea rentable la operatividad de ese módulo, o que resulte más atractivo reemplazarlo por un modelo nuevo. En estas condiciones se consideraría que el módulo ha llegado al final de su vida útil, momento en el que debe ser retirado de su funcionamiento. Los fabricantes, en general, garantizan una reducción de potencia de menos del 20% con respecto a la potencia nominal en condiciones estándar de medida (1000 W/m<sup>2</sup>, 25C, AM 1.5G) para toda la vida del módulo, que suelen estimar entre 20 y 30 años.

## EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA EN ESPAÑA Y GENERACIÓN DE RESIDUO. RECICLAJE

La ubicación de España al sur de la Unión Europea, con un clima templado y una irradiación solar elevada la hace idónea para la utilización de la energía solar en general, y en particular la fotovoltaica por su bajo coste. La potencia FV acumulada ha tenido un crecimiento sostenido a lo largo de las últimas décadas, con un cambio de pendiente al alza en los últimos años motivado por los planes de descarbonización de la economía. Concretamente, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima de España (PNIEC 2020) establece como objetivos en el año 2030 un 42% de energías renovables sobre el consumo total de la energía final y un 74% de energías renovables en la generación eléctrica en 2030. Para la fotovoltaica, se estima un objetivo de 39,181 GW en 2030. Esto supondría, teniendo en cuenta la potencia acumulada en 2020, un incremento de 25,6 GW en 9 años. La figura 2 presenta la evolución de la potencia FV acumulada en España desde 2006, incluyendo el dato de 2020 y un crecimiento lineal hasta 2030 para lograr el objetivo del PNIEC.

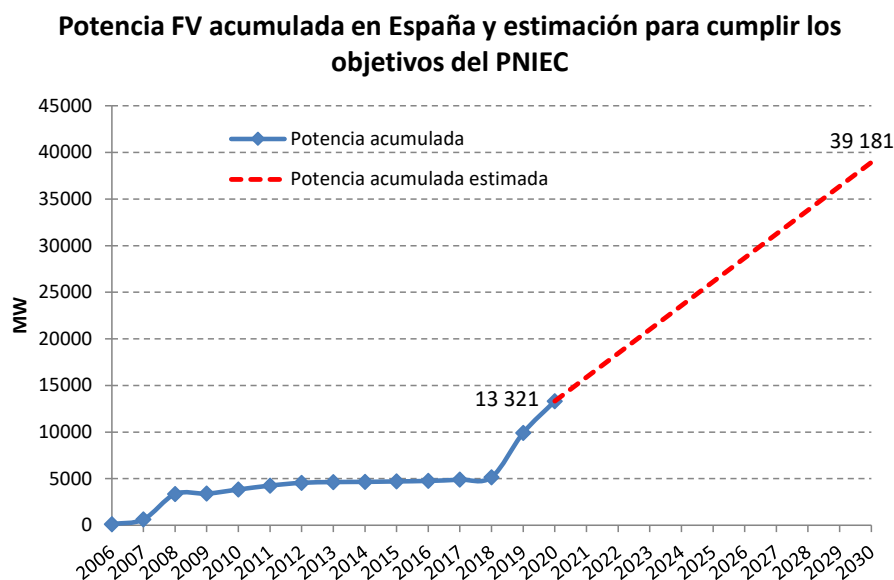


Fig. 2. Evolución de la potencia fotovoltaica acumulada en España desde 2006. (Fuente de los datos históricos: UNEF, [www.UNEF.es](http://www.UNEF.es)).

Esta expansión hará que gran cantidad de módulos alcancen el final de su vida útil. Se generará una gran masa de residuo según los módulos vayan alcanzando su tiempo estimado de funcionamiento, que se estima en torno a 25-30 años, o incluso superior como han anunciado recientemente algunos fabricantes (Bellini E. 2022). Esto constituirá en un futuro el grueso de la masa de residuo, pero, además, hay que tener en cuenta que no todos los módulos FV

fabricados en un determinado momento terminarían su operatividad a la vez. Habrá anualmente, desde el comienzo de su puesta en funcionamiento, una cierta cantidad de módulos que podrían presentar fallos en tiempos menores a su vida útil estimada, y que hay que tener en cuenta a la hora de estimar la masa de residuo (IRENA/IEA 2016). Cálculos previos (Santos J.D, 2018) y actualizaciones de los mismos (Santos J.D. 2019), que tienen en cuenta estas suposiciones y diversas proyecciones de la capacidad FV acumulada a futuro, sitúan la masa de residuo FV en España entre 70.000 y 200.000 toneladas en 2030, y más de un millón en 2050.

Las plantas e instalaciones FV están distribuidas por toda la geografía española. Esto implica que es necesario la existencia de canales adecuados para la recogida y redirección de los módulos FV que han terminado su operatividad, o pudieran ser reparados para seguir funcionando.

### Situación del reciclaje de módulos fotovoltaicos en España

En Europa, la directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012 (Directiva 2012/19/UE, 2019), incluye los módulos FV como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Esta directiva hubo de transponerse a los países miembros, siendo en España el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero (Real Decreto 110/2015, 2015). Este Real decreto incluye la actualización de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Ley 22/2011, 2011), y deroga el antiguo Real Decreto sobre residuos eléctricos y electrónicos. La actual ley vigente sobre residuos y suelos contaminados es la ley 7/2022, de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Ley 7/2022, 2022).

El Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, recoge también criterios técnicos sobre cómo deben recogerse, almacenarse y tratarse los RAEE. Los criterios relativos a la recogida y almacenamiento, están enfocados en proteger los RAEE para favorecer la preparación para la reutilización y mejorar la eficacia del tratamiento posterior. Estos criterios incluyen medidas como por ejemplo, el almacenaje bajo cubierta o protección adecuada durante el traslado de los residuos. En cuanto al tratamiento específico de los RAEE, este real decreto desarrolla las condiciones mínimas contenidas en la Directiva 2019/12/UE y establece 7 grupos de tratamiento de RAEE diferentes en función de las necesidades de cada grupo. Dentro de estos grupos, dos están dedicados a los paneles FV, en función de si contienen cadmio o no. El tratamiento de los paneles se basa en la separación de los componentes metálicos y electrónicos accesibles y en la separación de los materiales del resto del panel para, por un lado, eliminar las sustancias peligrosas como el cadmio, y por otro poder reciclar o valorizar el resto de materiales.

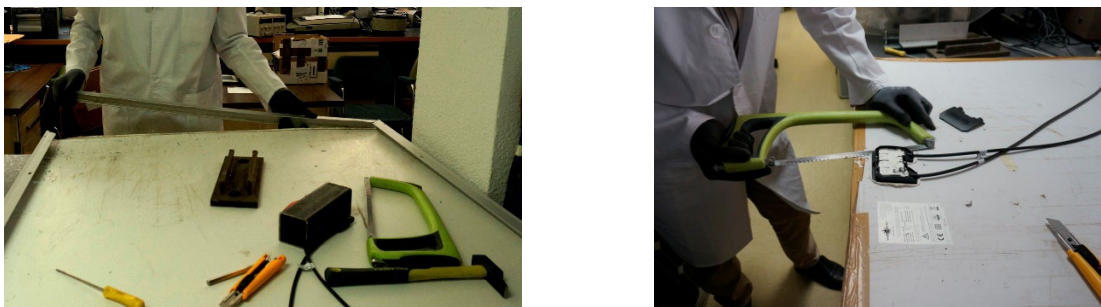


Fig. 3: Desmontaje manual de marco de aluminio y caja de conexiones de un módulo

El Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD) es el encargado de implementar las medidas incluidas en el Real Decreto 110/2015, entre las que se pueden destacar las de establecer los objetivos y condiciones de recogida, reciclado y valorización o definir el correcto tratamiento de los módulos FV. Estas medidas se orientan hacia la mejora en la recogida separada de los residuos y el aumento en la eficacia del reciclado de los módulos FV.

Además, los módulos FV se encuentran bajo la responsabilidad ampliada del productor, lo que le obliga a asegurar la correcta recogida y el tratamiento adecuado de los residuos que generen sus productos al final de su vida útil. El productor, según se define en el artículo 3 de este real decreto, puede ser el fabricante, el que vende bajo su propia marca, el importador o el productor en otro país que vende directamente a usuarios finales. Los productores de módulos FV se organizan a través de sistemas de responsabilidad ampliada del productor para garantizar el cumplimiento de las obligaciones derivadas de la responsabilidad ampliada del productor. Estos sistemas pueden ser individuales o colectivos. En el caso de los sistemas colectivos, se requiere para poder operar una autorización administrativa, que en el caso de España se otorga por la comunidad autónoma donde radica la sede social del sistema, pero tiene vigencia en todo el territorio del Estado. Para garantizar la coordinación en el proceso de autorización de

estos sistemas, la autorización se revisa e informa en la Comisión de coordinación en materia de residuos, donde se encuentran representadas todas las administraciones (estatal, autonómicas y locales).

Así mismo, al tratarse de un residuo incluido en la responsabilidad ampliada del productor de aparatos eléctricos y electrónicos, el MITERD colabora con las comunidades autónomas en el seguimiento de las actividades de los productores de estos aparatos. Finalmente, el MITERD es el encargado de remitir a la Comisión Europea la información sobre la gestión de los RAEE en España. La tabla 1 se recoge la evolución de la gestión de los módulos FV desde el año 2017. En dicha tabla, *residuo tratado* se refiere a la cantidad de residuo que ha sido recibido en una planta de tratamiento final de RAEE y ha sido sometido al procedimiento de tratamiento correspondiente, de acuerdo con el RD 110/2015, y las *cantidades valorizadas* son las cantidades de material procedente de los residuos de paneles FV, que tras haber recibido el tratamiento adecuado, se han destinado a operaciones de valorización, como por ejemplo valorización energética, reciclado y preparación para la reutilización.

Tabla 1. Masa de residuo FV recogido en España durante los años 2017-2019

Año	Total recogido (toneladas)	Tratado (toneladas)	Valorizado (Toneladas)	Preparado para reutilización/reciclado (ton.)
2017	155,13	149	134,10	120,21
2018	461,89	276	248,55	240,35
2019	226,15	150,53	117,29	104,33

Como medida adicional para mejorar la trazabilidad de los RAEE y de los módulos FV, el MITERD está desarrollando una herramienta informática, la Plataforma electrónica de RAEE. Esta plataforma registrará todas las entradas y salidas de RAEE de las instalaciones de recogida, almacenamiento y tratamiento, y mejorará su control a través de la creación de unas etiquetas específicas para los módulos FV. A través de estas etiquetas se conocerá en cualquier momento el itinerario que sigue cada módulo hasta llegar a la instalación donde será tratado. Las administraciones públicas podrán acceder a esta información en tiempo real a través de conexiones seguras.

#### REUTILIZACIÓN DE MÓDULOS CON DEFECTOS REPARABLES

Una de las cuestiones que está despertando más atención a nivel internacional en la actualidad es la posibilidad de realizar reparaciones en los módulos con objeto de evitar un fin de vida prematuro. Los fabricantes de módulos FV establecen unas garantías crecientes para sus módulos FV, tradicionalmente entre 20-30 años, aunque recientemente algún fabricante ha anunciado garantías de funcionamiento de hasta 40 años (Bellini, 2022). Sin embargo, es posible que los módulos presenten fallos a edades tempranas (Muñoz 2011, IRENA/IEA 2016). En ciertos casos, la reparación de defectos leves es una opción medioambientalmente favorable siempre y cuando se garantice la viabilidad y seguridad de la reparación. La opción de realizar reparaciones en módulos con defectos leves está siendo aceptada por la comunidad internacional sin estar exenta de controversias. En general, los módulos FV pasan por una serie de ensayos de cualificación que garantizan su fiabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo. Entre ellas puede destacarse la norma internacional IEC 61215 (UNE-EN IEC 61215-2, 2021) y la IEC 61730 (UNE-EN IEC 61730, 2019), existiendo además otros muchos estándares en el grupo de trabajo 2 de la Comisión electrotécnica internacional que incluyen la realización de diversos tipos de ensayos. Si un módulo es reparado, por un lado perdería su certificación IEC-61215, pero además, serían necesarios al menos una serie de ensayos básicos que garantizaran su seguridad a lo largo del tiempo. Adicionalmente, la reparación y posibles ensayos de garantías posteriores deberían tener un coste bajo para que estos módulos pudieran ser competitivos frente al reemplazo por módulos nuevos, con precio decreciente a lo largo de la historia. Con esta opción entran en juego criterios de garantía y seguridad, económicos, y medioambientales. Para que esta vía pueda implantarse de manera general es necesaria una definición de los tipos de defectos que podrían repararse en los módulos, las características de las reparaciones, garantías de las mismas y opciones de utilización de los módulos reparados.

El proyecto FOTOVOL3R trabaja en esta vía explorando diversas opciones de reparación, y evaluando la viabilidad de las reparaciones, tanto mediante ensayos acelerados como mediante la instalación de una planta real con módulos reparados.

#### IMPACTO MEDIO-AMBIENTAL Y MEDIDA DE LA CIRCULARIDAD

Se espera que las opciones de fin de vida planteadas tengan un impacto positivo sobre el medio ambiente. Para poder cuantificar los beneficios se van a aplicar métodos para el análisis de la Huella Ambiental (HA), basado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y el cálculo de los índices de circularidad de los escenarios propuestos, que serán comparados con los tradicionales basados en una economía lineal considerando todo el ciclo de vida de los módulos.

El ACV es un procedimiento analítico que evalúa el ciclo de vida completo de un proceso o producto, tratando de calcular los impactos ambientales potenciales desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final. Mediante el ACV, la composición y las cantidades de contaminantes generados y de recursos consumidos pueden valorarse en términos de sus impactos potenciales al medio ambiente, agrupándolos en un número reducido de categorías medioambientales. Un ACV comprende cuatro fases: i) Definición de objetivos y el alcance, en donde se definen los objetivos globales, la finalidad del estudio, el producto a estudiar, el destinatario previsto, el alcance del estudio, y la unidad funcional a la cual referir los resultados, ii) El análisis del inventario del ciclo de vida, que comprende la obtención de datos (entradas de materiales y energía, y salidas de contaminantes) y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos en cada una de las fases del ciclo de vida, iii) La evaluación del impacto del ciclo de vida, que tiene como propósito evaluar lo significativo que son los impactos ambientales utilizando los datos del inventario, empleando modelos de caracterización. En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos, y, iv) La interpretación de los resultados, en la que se combinan los resultados del inventario con los de la evaluación del impacto. Esta fase debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones. La HA es el método armonizado por la Comisión Europea para analizar el impacto medioambiental potencial, que considera las 16 categorías determinadas en el modelo *International Reference Life Cycle Data System ILCD 2011 midpoint* (European Commission, 2011), recomendado en la guía de HA (DOUE, 2013).

El Índice de Circularidad de Materiales (ICM) es una herramienta que forma parte de un proyecto desarrollado por *The Ellen MacArthur Foundation* y *Granta Design*, y que permite identificar el valor circular adicional de sus productos y materiales. Además, posibilita el análisis y la evaluación de una variedad de riesgos ambientales, regulatorios y de la cadena de suministro para sus diseños y productos, permitiendo la toma de decisiones sobre las compensaciones entre la circularidad y los objetivos económicos, ambientales y sociales sobre el diseño de productos y la adquisición de materiales. Este índice consta de diversas variables, esencialmente a partir de una combinación de tres características de cualquier producto: i) La masa de materia prima virgen utilizada en la fabricación, ii) La masa de residuos irre recuperables que se atribuyen al producto, y, iii) El factor de utilidad que representa la longitud e intensidad del uso del producto. El valor oscila entre el 0,1 (totalmente lineal) y el 1,0 (totalmente circular). La figura 4 presenta el diagrama de flujo para el cálculo de ICM.

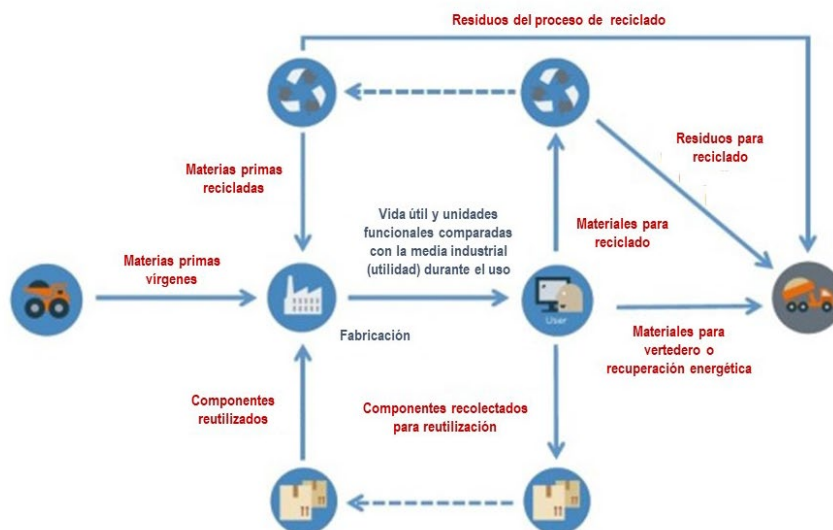


Fig. 4: Diagrama de flujo de materiales (Ellen MacArthur, 2019)

Estudios publicados de aplicación del ACV demuestran los beneficios de los tratamientos de fin de vida, como el de Latunussa et al. (2016), que proporciona información transparente y desglosada sobre la etapa de fin de vida útil de un panel fotovoltaico de silicio. El artículo destaca que los impactos se concentran en la incineración de las capas de encapsulante del panel, seguida de los tratamientos para recuperar los metales como el silicio o el aluminio, entre otros. Como datos, alrededor del 50% del impacto potencial del calentamiento global se debe a la incineración de los materiales de la capa y a los tratamientos posteriores a la incineración, en el que el transporte es relevante para varias categorías de impacto. Stolz et al. (2017) presentan un informe muy completo publicado por el consorcio de la IEA

Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS). En él se detallan los inventarios del ciclo de vida del reciclaje de módulos fotovoltaicos de c-Si y CdTe, siguiendo varios enfoques de modelado relacionados con el reciclaje. Aun cuando la mayoría de los impactos ambientales son menores, cabe destacar que la recuperación de vidrio, metales y materiales semiconductores de los módulos causa menores impactos ambientales que la extracción, fabricación y suministro de los respectivos materiales a partir de recursos primarios. Por tanto, los mayores beneficios potenciales se observan en el indicador de agotamiento de recursos fósiles y minerales.

## IMPACTO SOCIAL

En el proceso de adopción de energías renovables, las actitudes públicas sobre la tecnología juegan un papel muy relevante, de forma que la aceptación social de la misma es crucial para su introducción exitosa en la sociedad. Por ello en el proyecto FOTOVOL3R se ha incluido un paquete de trabajo dedicado exclusivamente a abordar la dimensión psicosocial de la energía fotovoltaica y, en concreto, de los módulos FV. La investigación empírica en este paquete de trabajo evaluará la percepción y aceptación general del público de los módulos fotovoltaicos, como usuarios potenciales de tecnología, así como su disposición a comprar esta tecnología. El trabajo empírico también profundizará en los determinantes de la aceptación pública, con el fin de formular alguna recomendación para mejorar la comunicación y difusión pública. Los resultados permiten derivar un marco que explica las actitudes y la aceptabilidad de los módulos fotovoltaicos, considerando tanto los factores contextuales como los psicológicos y sociales.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo es parte del proyecto PID2020-118417RB-C21, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033.

## REFERENCIAS/REFERÊNCIAS

Bellini E. (2022) Maxeon extends IBC modules' product, performance warranty to 40 years. PV magazine. Disponible en: <https://www.pv-magazine.com/2022/02/03/maxeon-extends-ibc-modules-product-performance-warranty-to-40-years/>

COM 773 Final (2018). Un planeta limpio para todos La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo, al Comité de las Regiones y al Banco Europeo de Inversiones*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>.

COM 640 final (2019). Un planeta Verde para Todos. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité De Las Regiones. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.

DOUE. (2013). Recomendación de la Comisión, de 9 de abril de 2013, sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida. Diario Oficial de La Unión Europea, L/124. Retrieved from <https://www.boe.es/doue/2013/124/L00001-00210.pdf>

Directive 2012/19/EU (2012) of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), EU, Brussels.

Ellen MacArthur, F. (2019). Circularity Indicators. An approach to Measuring Circularity - Methodology, 1–64. Retrieved from <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circularity-indicators/>

European Commission. (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Publications Office of the European Union (Vol. First edit). Luxemburg. <https://doi.org/10.278/33030>

International Energy Agency, 2016. International renewable energy agency. In: End-of-Life Management. Solar Photovoltaic Panels. <http://iea-pvps.org/index.php?id=381>

Köntges M., Kurtz S., Packard C. E., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M., Wohlgemuth J., Miller D., Kempe M., Hacke P., Reil F., Bogdanski N., Herrmann W., Buerhop-Lutz C., Razongles G., and Friesen

G., (2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules, IEA International Energy Agency-ISBN 978-3-906042-16-9, Report, 2014.

Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.

Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Available at: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809&p=20220409&tn=1>

Ley 22/2011 (2011), de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

PNIEC 2020. PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030 (2020). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>.

Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Disponible en <https://www.boe.es/eli/es/rd/2015/02/20/110>.

REGLAMENTO (UE) 2021/1119 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de junio de 2021 o por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) n. 401/2009 y (UE) 2018/1999. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>

Santos J.D., M.C. Alonso-García M.C. (2019). Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. *Journal of Cleaner Production* 196 (2018) 1613-1628

Santos J.D., Alonso-García M.C., N. Vela N. Update of the Projection of the Photovoltaic Waste in Spain until 2050. *Proc. of the 36th EU PVSEC*, 09 - 13 September 2019, Marseille, France, pp 1234-1240.

Solar Power Europe (2021): EU Market Outlook for Solar Power 2021-2025.

Stolz, P., Frischknecht, R., Wambach, K., Sinha, P., & Heath, G. L. B.-S.-F. (2017). Life cycle assessment of current photovoltaic module recycling. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12 (Vol. 13).

UNE-EN IEC 61215-2:2021 (2021). Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación. Parte 2: Procedimientos de ensayo.

UNE-EN IEC 61730 (2019). UNE-EN IEC 61730-1:2019. Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.. UNE-EN IEC 61730-2:2019. Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos.