

Una mirada al futuro del reciclaje de paneles fotovoltaicos en España

Marcos Ruiz Escudero

Máster en Energía Solar Fotovoltaica

Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid

Madrid, España

mruizescudero@gmail.com

Resumen—El reciclado es una tarea pendiente para asegurar la sostenibilidad en la fabricación de módulos fotovoltaicos. En este trabajo, se discuten las dificultades técnicas del reciclado de paneles solares, las estrategias económicas para llevar a cabo dicho reciclado y las expectativas de una industria del reciclado para el caso español.

Palabras clave—fotovoltaica, reciclaje, España, responsabilidad ampliada del productor, industria, futuro.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica (FV) fue, en 2019, la fuente de energía más instalada, representando el 40% de la nueva capacidad energética mundial en 2019 [1]. A su vez, la Agencia Internacional de la Energía declaraba, en este mismo año, que la FV se había convertido en la más barata de la historia [2].

El 2019 fue también un gran año fotovoltaico para España, batiendo su récord histórico de potencia instalada tanto en plantas (con 4201 MW de nueva capacidad) como en autoconsumo (con 459 MW); siendo líder en el mercado europeo y el sexto a nivel mundial [3].

Finalmente, la energía FV parece haberse hecho hueco en el mix energético mundial, siendo una de las tecnologías más relevantes en la lucha contra el cambio climático, tal y como demuestran sus ~ 40 g CO₂ eq/kWh de emisiones frente a los ~ 1000 g CO₂ eq/kWh que emite el carbón [4]. Sin embargo, las emisiones FV no deben ser despreciadas solamente porque sean mucho menores a las provenientes de las energías fósiles. Por lo tanto, una revisión al ciclo de vida de los módulos FV es necesaria, ya que la fabricación de paneles es la responsable de la mayoría de las emisiones FV (60-70%) [4].

Precisamente, el reciclado de módulos FV surge como solución para reducir el impacto medioambiental de la industria FV, a la vez que las materias primas para la producción FV quedan aseguradas [5]. En este trabajo, hablaremos de las dificultades técnicas que conlleva el reciclado de módulos, de las medidas sociales y económicas necesarias para llevar a la FV a conseguir un ciclo de vida sostenible, concretando para el caso español y discutiendo las posibilidades de una industria del reciclado de paneles FV en España.

II. DIFICULTADES TECNO-ECONÓMICAS EN EL RECICLADO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A pesar de los beneficios sociales y medioambientales, sin beneficios económicos, el desarrollo de una industria del reciclaje FV será de una alta complejidad. Estudios del 2010 y anteriores se centraban en el reciclaje de módulos de película delgada, como el CdTe, por la alta rentabilidad de sus materiales raros, por la contaminación mediambiental que podría provocar la alta toxicidad de sus materiales, además de por las altas expectativas que había respecto a su futuro crecimiento en el mercado FV [6]. Sin embargo, el dominio del mercado por parte de los módulos de Si continúa, siendo estos más del 90% de la producción actual de células solares [7]. Por ello, en nuestro estudio, nos centraremos en el reciclado de los paneles de Si, agrupando los paneles de silicio monocristalino y los de silicio multicristalino, ya que el proceso de reciclado en ambos es idéntico [6].

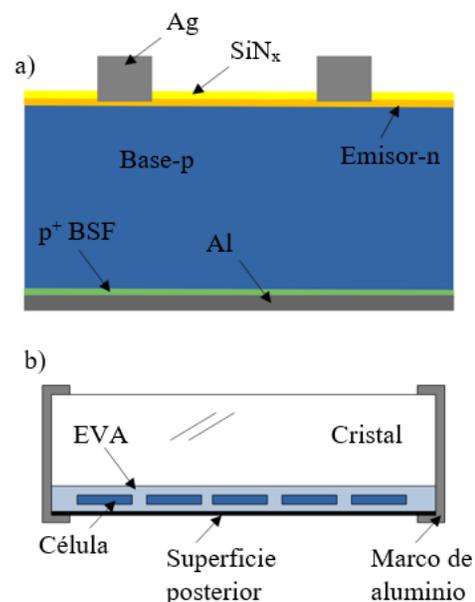


Figura 1. Estructuras de una célula solar de silicio (a) y de un módulo solar de silicio (b) más comunes en el mercado fotovoltaico [8].

La Fig. 1 muestra las estructuras más comunes de células solares y módulos FV de Si que se encuentran actualmente en el mercado. Hay tres partes en la célula formadas por Si: la base de 180-200 μm , el emisor de $\sim 0,3 \mu\text{m}$ fuertemente dopado tipo-n y el BSF (Back-surface field / contacto selectivo trasero) de $\sim 10 \mu\text{m}$, fuertemente dopado tipo-p. La capa antirreflectante de SiN_x tiene $\sim 75 \text{ nm}$. El electrodo superior es de Ag y el posterior de Al. En el módulo, las células están interconectadas con cables de Cu soldados con Sn y Pb. Al lado posterior del cristal se laminan las células interconectadas (que han sido preservadas entre dos láminas de etilvinilacetato (EVA)) y, posteriormente, una lámina de fluoruro de polivinilo (PVF). Para sellar el módulo se utiliza un marco de Al. Por último, una caja de conexiones, con cables para la conexión del módulo, se unen a la lámina posterior [8].

Para nuestro estudio de reciclaje, será útil definir en términos de su porcentaje en masa, los materiales que componen las estructuras de la Fig. 1: 76 % cristal, 10 % polímero, 8 % Al, 5 % Si, 1 % Cu, 0,1 % Ag [1]. De la compleja estructura de las células solares y su bajo porcentaje en materiales valiosos, podemos deducir que conseguir un método sostenible y rentable es extremadamente complejo. Hay en general, dos grandes estrategias: El Downcycling (Reciclar hacia abajo), donde se extraen materiales contaminados y por lo tanto de baja calidad para su reutilización. Y el Upcycling (Reciclar hacia arriba) en el que se extraen materiales de alta calidad que pueden reutilizarse en aplicaciones de alto valor económico [9].

El Downcycling es un método sencillo que consiste en separar el marco de Al, los cables y la caja de conexiones y triturar el resto del módulo. Después de diferentes procesos mecánicos de clasificación, se consigue separar la mayor parte del cristal y el aluminio, desechando el resto de materiales [9].

El Upcycling pretende no solo reciclar el cristal y el Al, sino también el resto de materiales, en un estado óptimo para su reutilización. Primero, se separa la célula solar del cristal mediante métodos térmicos, químicos o mecánicos. Después, se separan los metales (Ag, Al y Cu) del Si mediante complejos procesos químicos y térmicos, pudiendo llegarse a extraer Si de suficiente calidad como para poder ser reutilizado en paneles fotovoltaicos. Se han probado y estudiado diferentes procesos, pero es necesaria más investigación y desarrollo para hacerlos competitivos y encontrar el óptimo en términos de eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad [9].

III. INICIATIVAS, POLÍTICAS Y ORGANISMOS EN EL RECICLAJE FOTOVOLTAICO

No cabe duda de que los avances en las técnicas de reciclado son fundamentales en la mejora de la sostenibilidad de la energía FV. Sin embargo, el reciclado en sí es tan sólo una pequeña parte de toda una cadena que consigue que el módulo no acabe en un vertedero, sino que los materiales que lo componen puedan volver a ser utilizados, en la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos idealmente, o para otros usos [10].

Con este fin, se han aplicado diferentes iniciativas para lograr el reciclaje de los módulos. Estos métodos varían de forma significativa dependiendo del material en el que están basadas las células solares. Si están basadas en materiales no muy abundantes en la corteza terrestre, como es el caso de las células CIGS, se reciclarán, ya que aportan un beneficio económico significativo [6]. Sin embargo, cuando hablamos de módulos FV basados en Si, que en la actualidad representan más del 90 % de la producción [7], el proceso de reciclado no es tan rentable, por lo que es necesaria la aplicación de políticas de responsabilidad a los productores [6].

Así pues, la Unión Europea incluyó los módulos fotovoltaicos en su directiva de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE 2012/19/UE), en la que todo productor y distribuidor de estos aparatos está obligado a participar en el posterior reciclaje de los productos que ponga en circulación. Esta directiva obliga a tener en los módulos una tasa de recolección del 85 % y de reciclaje del 80 % [11].

Uno de los organismos referentes en el reciclaje de módulos es PV Cycle [12], una organización sin ánimo de lucro fundada en 2007 en Bélgica por y para la industria fotovoltaica, que estableció la primera red de recolección y reciclaje de módulos fotovoltaicos. Además, la compañía se encarga de ofrecer soluciones en cuestiones técnicas, legales y organizativas a diferentes empresas encargadas de la gestión de residuos en la unión europea, siendo la única organización acreditada para el reciclaje de módulos en Francia y Bélgica.

En 2013, la compañía encargada del reciclaje de módulos en España, Recyclia, firmó un acuerdo de colaboración con PV Cycle y actualmente logran un 88 % del reciclaje de módulos fotovoltaicos mediante Downcycling, superando en ocho puntos la normativa europea [13].

IV. LA POSIBILIDAD DE UNA INDUSTRIA DEL RECICLAJE EN ESPAÑA

Con el objetivo del actual gobierno español de lograr una transición energética, la industria fotovoltaica española está volviendo a resurgir [14]. La referencia [15] lista a España como candidata para albergar la vuelta de la producción fotovoltaica a Europa.

Por otro lado, pocos países fuera de la Unión Europea han tomado iniciativas en cuanto al reciclado de paneles solares. Cabe destacar la situación en China, donde a pesar de producir el 66 % de los paneles solares y haber instalado el 36 % del total instalado en 2019 [7], carecen de sistema para el reciclado de paneles solares de Si [16]. Esto pone a la cabeza a los países europeos y en particular a España, que ocupa actualmente la tercera posición en capacidad de gestión de residuos de módulos fotovoltaicos en Europa [17].

España fue uno de los primeros países en liderar la implantación de plantas fotovoltaicas, con una significativa explosión en 2008, año en el que instaló la mitad de la potencia fotovoltaica instalada ese año en el mundo [5]. Pese a haber perdido su liderazgo, ese primer desarrollo significa que España será uno de los primeros países que tendrá que gestionar una importante cantidad de módulos fotovoltaicos al final de su

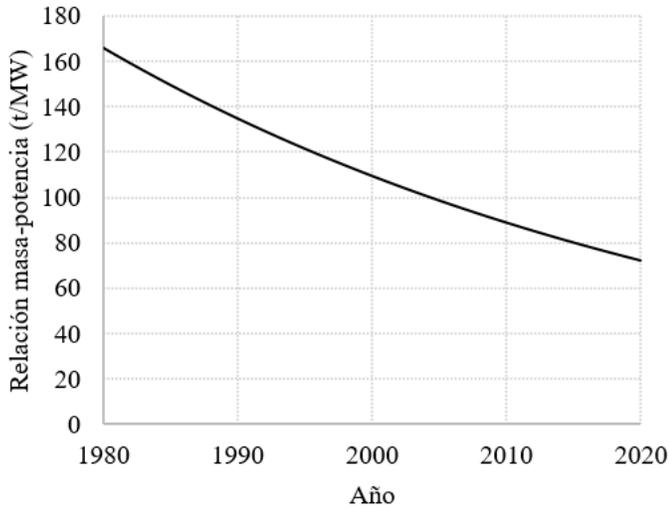


Figura 2. Relación entre la masa y la potencia con el paso de los años debida a la mejora de los paneles solares. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en [5].

vida útil [5], lo que daría a la industria española una importante ventaja en términos de desarrollo e investigación de métodos de reciclado FV.

Con el objetivo de poder hacer una previsión acertada respecto a una industria de reciclaje en España, la cantidad en masa de módulos FV que llegarán al final de su vida útil en los próximos años ha sido calculada. Para ello, necesitamos la relación entre la masa de los módulos y la potencia instalada en cada año. Esto se debe a que la potencia instalada anual es el dato más preciso que tenemos en relación al incremento de paneles fotovoltaicos en España de forma anual [18]. Debido a la continua mejora en eficiencia y coste material de los paneles fotovoltaicos, la relación media entre potencia y masa está decayendo progresivamente con el paso de los años [1]. Calcularemos esta relación mediante (1), que expresa el decaimiento exponencial de la relación entre masa y potencia instalada en el año i , tal y cómo se muestra en la Fig. 2. Del ajuste de los valores medios de relación-potencia en los módulos FV con el paso de los años, obtenemos las constantes $A = 1,1 \times 10^{20}$ t/MW y $B = 48,24$ años [5].

$$\text{Relación masa-potencia instalada}(i) = Ae^{-i/B} \quad (1)$$

Con los valores de la relación masa-potencia anual (RMPA) de la Fig. 2 y los datos de la potencia instalada anualmente (PIA) en España [18], obtenemos el resultado de la masa de paneles solares generada anualmente (MPSGA) con (2) para cada año i .

$$\text{MPSGA}(i) = \text{RMPA}(i) \times \text{PIA}(i) \quad (2)$$

A partir de estos datos, haremos dos aproximaciones para obtener en qué años se dispondrá de los módulos fotovoltaicos para su reciclaje. En la primera, los paneles solares tendrán una vida media de 30 años, consideración común en la literatura [1]. En la segunda, los paneles tendrán una vida media de

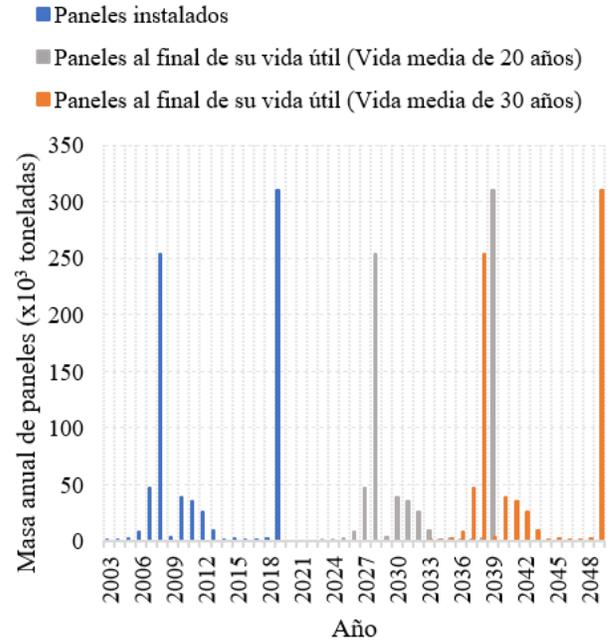


Figura 3. Comparación entre la masa de paneles solares instalados cada año y la masa de esos paneles solares cuando estén disponibles para reciclaje al final de su vida útil, para una estimación de 20 años de vida útil o de 30 años de vida útil. Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en [18].

20 años. Esto se debe a la consideración en [5] para el caso español de residuos solares, en el que se toma en cuenta que el período de explosión fotovoltaica española de 2008 coincidió con una profunda transformación en la industria global fotovoltaica, en la que los productores tradicionales europeos, japoneses y estadounidenses perdieron su liderazgo frente a los productores asiáticos. Este hecho se tradujo en una reducción de la vida útil de los módulos, de ahí la aproximación de una vida media de 20 años. Ambas aproximaciones pueden ser observadas en la Fig. 3.

De la Fig. 3 podemos deducir que con diferentes previsiones, aunque cambie el rango de años, la cantidad generada de residuos FV será irregular con el tiempo. Esto concuerda con los resultados obtenidos en [5] para el caso español, en el cual el máximo de la masa anual de residuos fotovoltaicos es seguido de un periodo de escasez que podría generar problemas para una creciente industria española de reciclaje.

Sin embargo, [5] también muestra cómo España tendría unos años en los que su masa acumulada de residuos solares superaría la de países que en la actualidad tienen una mayor capacidad fotovoltaica. Esta ventaja, no sólo será relevante en términos de economía de escala, sino en términos de investigación, puesto que países como China tienen el problema de no tener los suficientes residuos solares como para llevar a cabo un estudio sobre el reciclado [16]. ¿Cómo podríamos aprovechar esta ventaja, sin correr el riesgo de sobre-escalar la industria y tener un período de inactividad?

La solución que hemos estudiado, se basa en el almacenaje. Los módulos fotovoltaicos podrían quedar almacenados e irse

reciclando durante los años en los que la generación de residuos solares bajara. De esta manera, no habría que sobre-escalar la industria del reciclaje y a la vez la industria se beneficiaría de todas las ventajas que esa cantidad de residuos solares tempranos nos daría. También es una estrategia más segura, puesto que no haría falta acertar con la previsión de paneles FV generados cada año de manera exacta para poder llevarla a cabo.

Para estudiar la viabilidad de esta solución, hemos calculado cuánto espacio ocuparían los residuos solares asociados al boom fotovoltaico de 2008 (véase Fig. 3), que corresponden a una masa de 250.000 toneladas. Para ello, hemos tomado un módulo de referencia [19] de una de las empresas de referencia del momento, Aleo Solar [20]. Las dimensiones de este módulo son 1660 mm x 990 mm x 50 mm y su masa es de 21 kg. Con estos datos, podemos estimar el volumen que ocuparía nuestra masa de 250.000 toneladas, que resulta en 978.000 m³. Comparando esta cantidad con los 7 millones de metros cúbicos de capacidad que tiene el vertedero industrial de Nerva en España [21], observamos que sería posible el almacenamiento de esta cantidad de residuos solares.

V. CONCLUSIONES

La industria FV tiene una gran oportunidad de crecimiento en los años venideros. Esta oportunidad, deberá aprovecharse no sólo en términos de producción energética, sino para lograr un ciclo sostenible de producción fotovoltaica, apoyando proyectos europeos de producción y reciclaje de módulos FV, haciendo del ciclo de vida de los paneles uno más eficiente, sostenible y autosuficiente.

España tiene la oportunidad de ser un pilar en la estrategia europea de reciclaje FV. Deberá aprovechar los años de más generación de residuos solares, asociados al boom fotovoltaico de 2008, que superarán las 250.000 toneladas. El estudio realizado en este trabajo demuestra la capacidad española de almacenaje de estos residuos FV, que ocuparían 978.000 m³ y podrían almacenarse en vertederos industriales de España con capacidad de almacenaje de millones de metros cúbicos.

Esta capacidad para el almacenaje permitiría adaptar los ritmos de reciclado hasta que se estabilizara la generación de residuos solares. Al mismo tiempo, la industria española podría usar esta cantidad de residuos FV, superior a la de países con mayor producción actual FV, para convertirse en una industria puntera en el desarrollo y mejora de técnicas que consigan extraer materiales de alta calidad, de una manera eficiente, sostenible y rentable. Estas materias primas podrían reutilizarse en la fabricación de nuevos módulos FV, fomentando la producción FV europea y creando oportunidades laborales y económicas en España.

REFERENCIAS

- [1] IRENA, "Renewable Capacity Statistics", International Renewable Energy Agency, 2019.
- [2] IEA, "World energy outlook 2020", International Energy Agency, Paris, 2020.
- [3] UNEF, "El sector fotovoltaico hacia una nueva era. Informe anual UNEF 2020", Unión Española Fotovoltaica, España, 2020.

- [4] NREL, "Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics", National Renewable Energy Laboratory, EEUU, 2012.
- [5] J.D. Santos, M.C. Alonso-García "Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050," *Journal of Cleaner Production*, no. 196, pp. 1613-1628, 2018.
- [6] N.C. McDonald, J.M. Pearce, "Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules", *Journal of Energy Policy*, no. 38, pp. 7041-7047, 2010.
- [7] Fraunhofer ISE, "Photovoltaics report 2019", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Alemania, 2020.
- [8] Wen-Hsi Huang, Woo Jung Shin, Laidong Wang, Wen-Cheng Sun, "Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules", *Journal of Solar Energy*, no. 144, pp. 22-31, 2017.
- [9] Rong Deng, Nathan L. Chang, Zi Ouyang, Chee Mun Chong, "A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 109, pp. 532-550, 2019.
- [10] Noticias Parlamento Europeo, "Economía circular: definición, importancia y beneficios," 02 12 2015. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>. [Accessed 16 12 2020].
- [11] Deutsche Recycling, "Reciclaje de módulos fotovoltaicos o paneles solares", 2020 [Online]. Available: <https://deutsche-recycling.de/es/blog/weee2-reciclaje-de-modulos-fotovoltaicos-o-paneles-solares/> [Accessed 21 12 2020].
- [12] PV Cycle, "European Union", 2016 [Online]. Available: <http://www.pvcycle.org/services/european-union/> [Accessed 21 12 2020].
- [13] Recyclia, "Hasta el 88 % de un panel fotovoltaico puede reciclarse", 22 05 2020 [Online]. Available: <https://www.recyclia.es/panel-fotovoltaico-puede-reciclarse/> [Accessed 21 12 2020].
- [14] PV Magazine, "Nothing can stop Spain's solar train now", 9 10 2018 [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2018/11/09/nothing-can-stop-spains-solar-train-now/> [Accessed 21 12 2020].
- [15] Fraunhofer ISE, "Sustainable PV manufacturing in Europe", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Alemania, 22 07 2020.
- [16] Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang, "Global status of recycling waste solar panels: A review", *Journal of Waste Management*, no. xx, pp. xx, 2018.
- [17] Cambio Energético, "El reciclaje de las placas solares", 17 05 2019 [Online]. Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/reciclaje-placas-solares/> [Accessed 21 12 2020].
- [18] REE, "Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2019", Red Eléctrica de España, España, 2020.
- [19] Solar Design Tool, "Compare solar panels", 2009 [Online]. Available: http://www.solardesigntool.com/compare-solar-panels-modules.html?submit=Compare+Solar+Panels&modules=4015&modules=1135&modules=1137&modules=2254&modules=4011&_modules=on&compare=true [Accessed 21 12 2020].
- [20] IEA, "Trends in photovoltaic applications survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008", International Energy Agency, Suiza, 2009.
- [21] Cadena Ser, "El mapa de los vertederos en España", 19 02 2020 [Online]. Available: https://cadenaser.com/programa/2020/02/19/hoy_por_hoy/1582103458_865104.html [Accessed 21 12 2020].