



APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR A LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Mario de Anca Galera

Trabajo entregado para la obtención del grado de

MÁSTER EN TECNOLOGÍA AMBIENTAL

Modalidad: “Profesional”

Noviembre / 2021

Directores:

Dr. Manuel Jesús Gázquez González

Dr. Francisco Javier Santos Alamillos

D. Manuel Jesús Gázquez González con DNI: 34073072K y Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Física Aplicada en la Universidad de Cádiz y **D. Francisco Javier Santos Alamillos** con DNI: 30980328H y Profesor Ayudante Doctor en el Departamento de Física Aplicada en la Universidad de Cádiz

INFORMAN:

Que el trabajo titulado “**Aplicación de la Economía Circular a la energía fotovoltaica**” presentado por **D. Mario de Anca Galera, con D.N.I.: 28848484K**, ha sido realizado en bajo mi dirección, y AUTORIZO su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: “Investigación” o “profesional”), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 15 de septiembre de 2021

“¿Rúbrica o firma con certificado digital?”

Fdo.: Nombre del director/es del trabajo de fin de máster

RESUMEN

Los países que se encuentran explotando la energía fotovoltaica desde principios del 2000 no dimensionaron correctamente el incremento de ese tipo de instalaciones en las décadas posteriores y, por ende, de los residuos que generarían. El problema se centra sobre todo en el tipo de residuo y la dificultad para su valorización, dado que los paneles solares fotovoltaicos tienen un tiempo de vida media alto (25 años) se antojaba un problema a largo plazo. Ahora, los países que apostaron por este tipo de energía renovable no tienen infraestructuras suficientes para gestionar el flujo de residuos eléctricos y electrónicos (AEE) y, más en concreto, residuos de módulos fotovoltaicos que se han empezado a producir y que irán en aumento.

En este estudio se analiza tanto el volumen como los tipos de residuos de origen fotovoltaico que van a ser generados para actuar en consecuencia con los objetivos propuestos tanto por la Unión Europea como por España, dentro de la Agenda 2030 y 2050, y llevar a cabo la transición desde una economía lineal (instaurada actualmente) hacia una Economía Circular. Dichos objetivos no pueden ser alcanzados con un enfoque en un proceso concreto, sino que debe aplicarse el principio de las 3 “R” (reducir, reutilizar y reciclar) a diferentes pasos de la cadena productiva para así, poder optimizar el tratamiento de los paneles solares que han llegado al fin de su vida útil. Para analizar las diferentes posibilidades, este estudio propone distintos métodos de valorización de paneles fotovoltaicos c-Si según sus componentes.

La importancia de la valorización de residuos no reside únicamente en la recuperación de materias primas que permiten crear un ciclo productivo sostenible y económicamente beneficioso, sino que, además significa la retirada de elementos potencialmente peligrosos para el medio ambiente y para el ser humano, que pueden estar expuestos a agentes externos que favorezcan su propagación al medio.

ABSTRACT

Countries that have been exploiting photovoltaic energy since the beginning of 2000 did not correctly measure the increase in this type of facilities in subsequent decades and, therefore, in the waste they would generate. The problem focuses mainly on the type of waste and the difficulty in its recovery, since photovoltaic solar panels have a high average life time (25 years), it seemed a long-term problem. Now, the countries that opted for this type of renewable energy do not have sufficient infrastructure to manage the flow of electrical and electronic waste (EEE) and, more specifically, waste from photovoltaic modules that have begun to be produced and that will increase.

This study aims to analyze both the volume and types of waste of this photovoltaic origin that will be generated in order to act in accordance with the objectives proposed by both the European Union and Spain, within the 2030 and 2050 Agenda, and lead to carry out the transition from a linear economy (currently in place) to a circular economy. These objectives cannot be achieved with a focus on a specific process, but rather the principle of the 3 "Rs" (reduce, reuse and recycle) must be applied to different steps of the production chain in order to optimize the treatment of the solar panels that have reached the end of their useful life.

The importance of the recovery of waste does not only lie in the recovery of raw materials that allow creating a sustainable and economically beneficial production cycle, but also means the removal of potentially dangerous elements for the environment and for the human being, which can be exposed to external agents that favor its spread to the environment.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ESTADO ACTUAL DE LA ENERGÍA SOLAR A NIVEL GLOBAL Y LOCAL	1
1.2 ECONOMÍA CIRCULAR	3
1.2.1 <i>Introducción al pensamiento circular</i>	3
1.2.2 <i>Análisis de la Economía Circular</i>	5
1.3 PROBLEMÁTICA ECONÓMICA Y AMBIENTAL EN LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS FOTOVOLTAICOS GENERADOS	10
1.4 VENTAJAS DE LA VALORIZACIÓN DE LOS COMPONENTES Y SU RELACIÓN CON LA ECONOMÍA CIRCULAR	12
1.5 OBJETIVOS DEL TRABAJO	13
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS POR LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	15

2.1.1 Tipos de tecnologías fotovoltaicas	15
2.1.2 Funcionamiento células fotovoltaicas.....	18
2.2 CLASIFICACIÓN Y CICLO DE VIDA DE LOS RESIDUOS.....	20
2.3 CANTIDADES ESTIMADAS DE RESIDUOS	25
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSION	36
3.1 GESTIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS POR LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	36
3.2 OPCIONES DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS FOTOVOLTAICOS A NIVEL INTERNACIONAL	38
3.2.1 Reducción o sustitución	39
3.2.2 Reutilización	40
3.2.3 Reciclado	42
3.3 VALORIZACIÓN DE RESIDUOS FOTOVOLTAICOS EN ESPAÑA.....	49
3.3.1 Reducción o sustitución	50

3.3.2 <i>Reutilización</i>	51
3.3.3 <i>Reciclado o valorización</i>	52
3.4 ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL RECICLAJE Y VALORIZACIÓN DEL MATERIAL PROCEDENTE DEL DESMANTELAMIENTO DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS	54
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	58
REFERENCIAS	60

ACRÓNIMOS

AEE – Aparatos Eléctricos y Electrónicos

AMD – Drenaje Ácido de Minas (*Acid Mine Drainage*)

BNEF – Bloomberg New Energy Finance

COVID-19 – Enfermedad del Coronavirus 2019 (*Coronavirus disease 2019*)

CPV – Concentrador Fotovoltaico (*Concentrator Photovoltaics*)

ENTSO-E – Red Europea de Gestores de Transporte de Electricidad

GW – Gigavatio

IRENA – Agencia Internacional de la Energía Renovable (*International Renewable Energy Agency*)

LER – Lista Europea de Residuos

MW – Megavatio

NE – Estándares Europeos (*European Standards*)

OPV – Tecnología Fotovoltaica Orgánica (*Organic Photovoltaics*)

RAEE – Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

UE – Unión Europea

UNE – Una Norma Española

UNEF – Unión Española Fotovoltaica

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Estado actual de la energía solar a nivel global y local

Antes del nuevo milenio, el uso de la energía solar fotovoltaica tenía un papel secundario a nivel industrial, pero ya tenía potencial para convertirse en un generador importante de energía “limpia” (aquella que es respetuosa con el medio ambiente). En ese momento y en ese contexto, no existían muchas preocupaciones en cuanto al tratamiento futuro de los residuos que podrían generarse como consecuencia del desarrollo de esta técnica, sin embargo, con el tiempo esta cuestión ha pasado a tener un papel mucho más relevante. El inicio de los parques fotovoltaicos a gran escala y, por ende, el crecimiento exponencial de la energía solar fotovoltaica a principios de la década del 2000, fue liderado por los países europeos, destacando especialmente Alemania por ser de los primeros países que apostaron por este tipo de generación energética. Con el paso de los años, otros países a nivel global empezaron a invertir en esta energía renovable. Así fue como a partir del año 2014 el continente asiático se convirtió en líder del mercado global (Xu et al., 2018), controlando hasta el 60% del mismo. Lo pone de manifiesto la relevancia que ha adquirido, con el paso de los años, la energía fotovoltaica gracias al desarrollo tecnológico que ha permitido la optimización de la eficiencia de los paneles solares, además de la reducción de los costes debido al incremento del mercado tanto primario (módulos fotovoltaicos nuevos) como secundario (módulos fotovoltaicos reparados o reciclados). Como se puede observar en la Figura 1, el crecimiento de esta tecnología de generación energética es notable en los países asiáticos, sobre todo en China, que a pesar de poseer una capacidad total instalada de 205 GW, se estima que continúe con una evolución positiva entre los años 2020 y 2024, hasta una potencia total de 328 (en el mejor escenario).

A la vista de los datos (Figura 1), todo parece indicar que la inversión realizada por China en instalaciones fotovoltaicas le augura un elevado crecimiento durante los próximos cinco años como mínimo, seguido de Estados Unidos, India, Unión Europea y Japón. Es importante mencionar el aumento significativo que se va a dar en países como Arabia Saudí, Taiwán, Emiratos Árabes Unidos e Israel, entre otros, principalmente influenciados por nuevas políticas ambientales más sostenibles. En consecuencia, es posible proyectar diferentes escenarios evolutivos del mercado fotovoltaico (Europe, 2020). En el primer lustro de 2020 es posible estimar un escenario conservador, el cual predice un crecimiento del mercado fotovoltaico mundial de hasta 1177,5 GW una vez alcanzado el año 2024, mientras que por otro lado se estima un escenario optimista donde se predice un incremento de hasta 1678 GW. Entre estas dos proyecciones existe un escenario medio, el cual tendría en cuenta las trabas sufridas por la crisis mundial originada por la COVID-19 y, augura una recuperación del crecimiento esperado en el año 2022.

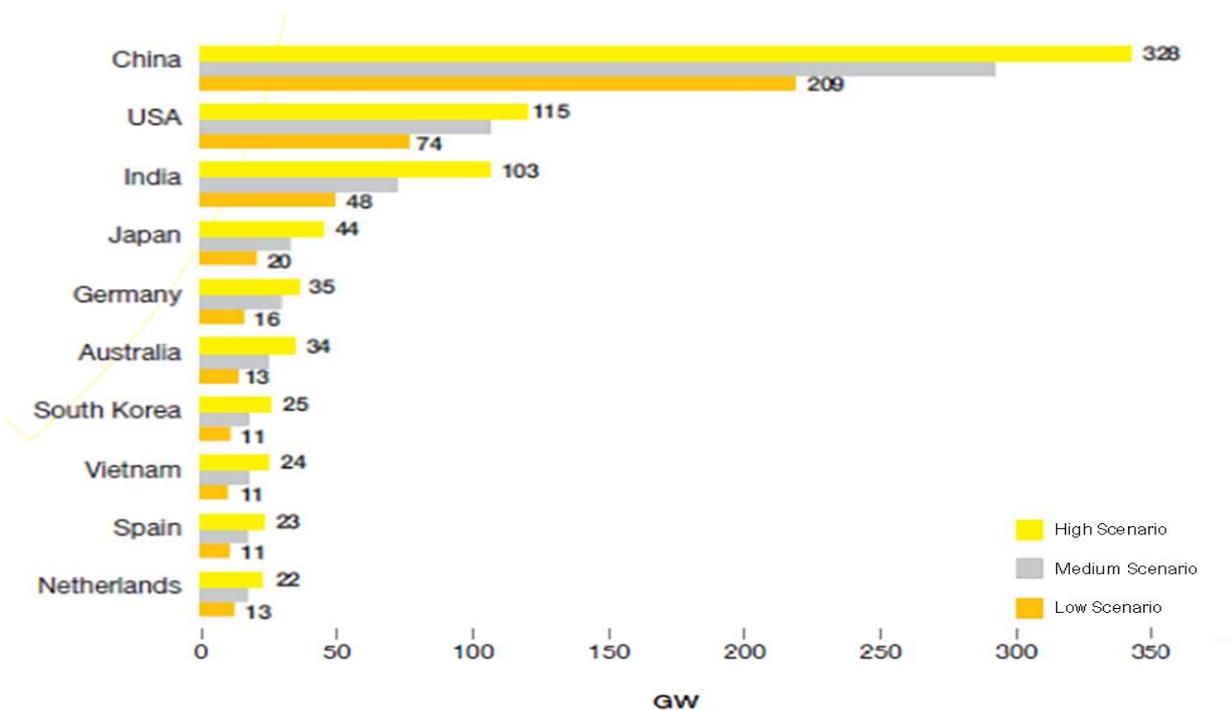


Figura 1. Los 10 mayores incrementos del mercado fotovoltaico (GW) entre 2020-2024. Fuente: Europe (2020).

A nivel europeo, existe un Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) aprobado por la Comisión Von der Leyen a principios de 2020, el cual desarrolla una estrategia de crecimiento sostenible donde se incluye la Agenda 2030 y 2050, que propone objetivos a todos los países europeos con la finalidad de convertirse en un continente “climáticamente neutro” mediante cambios no sólo económicos sino también sociales.

En lo que se refiere a España, el ámbito de la energía fotovoltaica es muy irregular a pesar de las buenas condiciones climáticas del país donde se da un elevado índice de radiación solar característico de zonas mediterráneas. Así, es importante destacar que el país vivió un auge de la energía solar fotovoltaica hasta el 2008, año en el que se produjo una crisis económica profunda, lo que provocó un descenso brusco de las inversiones en esta tecnología, como se puede apreciar en la Figura 2. Esta situación tuvo como consecuencia la priorización de otros sectores y la implementación de políticas y procedimientos administrativos que suponían un obstáculo para las energías renovables, posiblemente influidas por el sector de las energías fósiles.

Por otra parte, a pesar de los problemas mencionados, España está viviendo en la actualidad un segundo auge en esta materia, favorecido por el incremento significativo del interés de empresas energéticas en desarrollar esta tecnología y por la apertura de las nuevas políticas ambientales. Como prueba de esto, en las estadísticas proporcionadas por la Unión Española Fotovoltaica (UNEF 2020), se observa que 2019 fue un año récord en la mayoría de los índices fotovoltaicos del país, llegando a una potencia total instalada de 4.200 megavatios (MW).

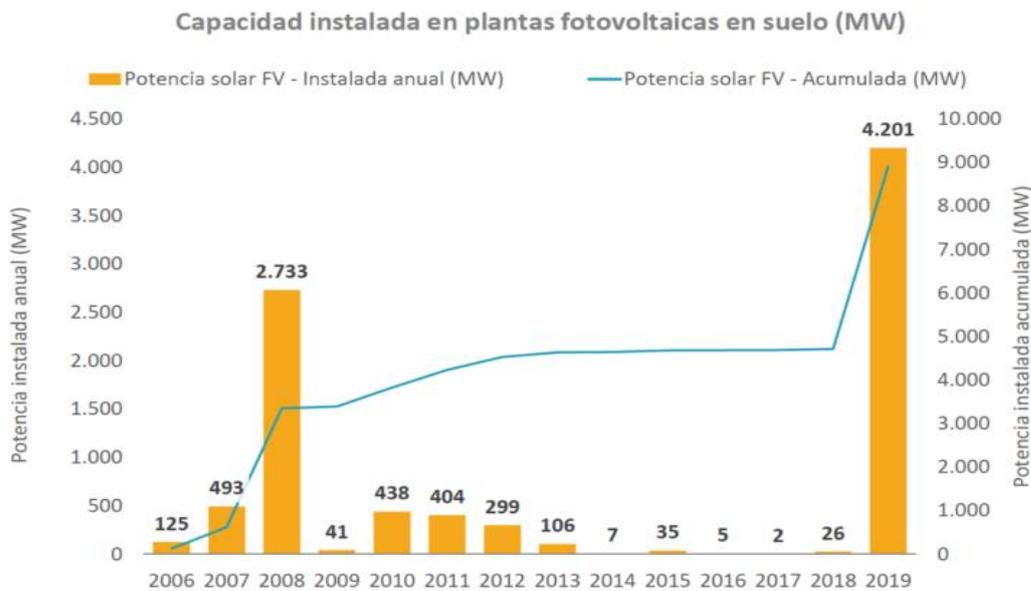


Figura 2. Capacidad instalada en plantas fotovoltaicas de suelo en España. Fuente: PV Magazine (2020)

En cuanto a la situación de Andalucía, la región acumula el 20,4% de la energía solar fotovoltaica del país (Sánchez, 2020), lo cual le confiere el estatus de comunidad autónoma líder en este tipo de generación de energía. En concreto, Sevilla, Córdoba y Málaga son las provincias donde más proyectos se han realizado.

Puede darse la circunstancia de que este contexto sea el adecuado para la instauración de nuevas políticas económicas y cambios en la gestión de los recursos y residuos, así como la aplicación del modelo de Economía Circular que permita reducir tanto el consumo de recursos como la contaminación provocada por las emisiones en el transporte y el depósito descontrolado de los mismos, o las lixiviaciones al suelo originadas por la acción de agentes meteorológicos.

1.2 Economía Circular

1.2.1 Introducción al pensamiento circular

Actualmente, el sistema de producción predominante a nivel mundial es el proceso lineal de consumo de recursos. Este modelo se puede explicar mediante el paradigma “take-make-waste” (“extraer-fabricar-consumir/eliminar), el cual se refiere a que la generación de residuos a partir de productos previamente fabricados con materias primas supone un problema dado que, no sólo se genera un consumo descontrolado de los recursos naturales, sino que también surge una acumulación de toneladas de basura en vertederos. Por tanto, dicho sistema es totalmente insostenible a medio-largo plazo, surgiendo así la necesidad de aportar algún valor a los residuos generados. A

raíz de esta problemática, surge la idea de “Economía Circular”, la cual intenta imitar el sistema natural, ya que en la naturaleza no existe el concepto de residuo ni vertedero. En este sentido, las salidas de un proceso (residuo) van a formar parte de las entradas de otro proceso (materia prima), lo que se denomina flujo de materiales (Gudín, 2019). No existen evidencias de un único origen en la idea de la Economía Circular, pero se pueden nombrar autores que influyeron notablemente en la evolución de este concepto, como Boulding, Pearce y Turner, o McDonough y Braungart.

En principio, la idea de la Economía Circular surgió a raíz de un ensayo titulado “*La Economía de la Nave Espacial Tierra*” escrito por Kenneth Boulding (1966), donde utiliza una nave espacial como metáfora del planeta Tierra, enfatizando de este modo sus limitaciones, tanto en la extracción de recursos como en la asimilación de residuos. De esta forma nacen los dos pilares fundamentales sobre los que se asienta el concepto de la Economía Circular:

- 1) Reducir el uso de recursos naturales; Dejamos de considerar al planeta como una fuente inagotable de recursos.
- 2) Reducir la generación de residuos; Dejamos de considerar al planeta como un vertedero infinito.

El pensamiento de Boulding cuestiona la adaptación de la economía estándar (economía lineal) a los avances científicos y usa la Segunda Ley de la Termodinámica (Rodríguez, 2012). De esta forma pretende aclarar que la Tierra debe considerarse como un sistema cerrado en cuanto a materiales se refiere, pero que se convierte en un sistema abierto si se trata de la energía. A partir de este punto y a lo largo de los años, como ocurre en muchos ámbitos, otros autores agregaron actualizaciones y enfoques renovados con la intención de concretar ideas diversas que permitieron la aplicación gradual de esta teoría económica, lo que supuso una mayor difusión de la misma.

En concreto, los autores que utilizaron el concepto de Economía Circular por primera vez fueron los británicos Pearce y Turner (1990) con el trabajo titulado “*Economía de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente*”. Posteriormente, los que llevaron a cabo un primer paso fundamental para desarrollar esta filosofía cíclica fueron McDonough y Braungart (2002) introduciendo la formulación denominada “de la cuna a la cuna” (*from cradle to cradle*). Con ella tratan de rediseñar la idea de producto para que las materias primas que forman parte de cada componente sean fácilmente accesibles una vez haya terminado su ciclo de vida, facilitando de esta forma la conversión del deshecho en materia prima potencial. Por tanto, a raíz de este momento es cuando se comienza a considerar la optimización todas las fases del proceso productivo como se desarrolla más adelante, para así facilitar el tratamiento del residuo final y reforzar el ciclo cerrado. Este sistema permite reducir considerablemente la cantidad de elementos --finitos, como todos sabemos-- que se extraen de la tierra y, por lo tanto, no sólo se reducen los impactos relacionados con la extracción, sino que además se resuelve el problema del deshecho de materiales que componen, por ejemplo, los aparatos eléctricos y electrónicos.

Hoy en día más autores siguen desarrollando argumentos que apoyen este tipo de economía, como es el caso Porcelli y Martínez (2018) sugiriendo una serie de limitaciones al modelo lineal:

- I. Riesgos de precios: la inflación de los precios de los recursos naturales provocada por el incremento de la población y la urbanización descontrolada.
- II. Pérdidas económicas y residuos estructurales: el modelo económico predominante en la actualidad produce una gran cantidad de residuos, lo que indica que grandes porcentajes de productos son desechados a lo largo de la cadena de valor.
- III. Riesgos de suministro: existe una diferencia significativa en cuanto a la cantidad de depósitos naturales de recursos no renovables que posee cada país, por tanto, se crea una descompensación y una dependencia de las importaciones.
- IV. Deterioro de sistemas naturales: agotamiento de reservas, calentamiento global, cambio climático, reducción capa de ozono, disminución biodiversidad, degradación del suelo y contaminación de océanos, entre otros.

Ante estas evidencias, cada vez es más urgente solicitar un cambio de modelo industrial que permita generar ingresos sin el consumo de materias primas que se está presenciando en la actualidad, por ejemplo, mediante la recuperación de las mismas. Es necesario demostrar que otros modelos son posibles y fiables, para así poder atraer la inversión. Además, es posible que el panorama mundial se agrave debido al aumento demográfico de la clase media mundial: hasta los 5 mil millones de personas en 2030. Esta cifra no sólo significa un incremento de población, sino también de los hábitos de consumo relacionados a estas personas (MacArthur, 2014). Uno de los mayores retos para que se puedan producir cambios en el consumo es la concienciación a nivel global, no sólo de personas, sino también de grandes empresas.

1.2.2 Análisis de la Economía Circular

La idea de acabar con el paradigma lineal establecido se empezó a incubar en las tres últimas décadas del siglo XX, pero fue en la última cuando la idea de economía circular comienza a cobrar fuerza asentándose a partir de las líneas de pensamiento representadas en la Figura 3, y se postula como una alternativa factible al modelo lineal.



Figura 3. Bases de la Economía Circular. Fuente: elaboración propia basada en Porcelli y Martínez (2018)

El desarrollo de la tecnología y, más en concreto de la tecnología informática propició la llegada de internet. Este hecho fue clave ya que permitió una rápida colaboración e intercambio de información y conocimiento. Esta conexión global surge a partir nuevas tecnologías de información y comunicación, las cuales permiten el desarrollo de prácticas más colaborativas. Este elemento es fundamental, dado que la economía colaborativa se refiere a prácticas relacionadas con compartir e intercambiar que cambian la idea de posesión de un producto y, suele implicar el uso de menos recursos naturales (PNUMA, 2015). El papel del consumidor cambia, pasando de ser propietario del producto a ser propietario del uso de ese producto, a modo de usufructo. De acuerdo con Gudín (2019), en esta nueva visión circular el productor no se desentiende totalmente del producto en ningún momento.

Es entonces cuando aparece el concepto de economía circular, un modelo regenerativo que pretende imitar los ciclos naturales donde el deshecho de un ser vivo es el alimento de otro. De esta forma se genera un ciclo autosuficiente donde el concepto de “caducidad” desaparece y da paso a la “restauración”, diferenciando entre ciclos técnico y biológico. Este sistema intenta evitar el uso de químicos tóxicos difíciles de valorizar y apuesta por el uso de energías renovables. Aunque, por otra parte, este trabajo expone que el mal diseño de los dispositivos para la generación de energía limpia puede generar problemas a la hora de la reutilización o el reciclaje.

Los ciclos biológico y técnico, anteriormente mencionados, se encuentran funcionando en paralelo. En el biológico encontramos elementos biodegradables que pueden ser reintroducidos en la naturaleza al final de su uso, cuando se desvaloriza. En cambio, en el técnico encontramos elementos que no pueden ser devueltos a la naturaleza de inmediato, por lo que deben ser reutilizados repetidas veces. Es por esta razón, por la que el ecodiseño es fundamental, dado que facilita el ensamblaje y desmontaje de los componentes, favoreciendo un ahorro, tanto en recursos como en energía.

La Economía Circular se divide en tres principios claves desarrollados por Porcelli y Martínez (2018), abordando cada uno de ellos diferentes desafíos:

Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables → Controlar los recursos que se extraen y administrarlos de forma cautelosa evitando o reduciendo el derroche, asegurando el uso de procesos y tecnologías que causen el menor impacto posible y posean un alto rendimiento. Uno de los pilares de este principio es el ecodiseño, el cual tiene en cuenta el impacto que un producto y todos sus componentes pueden provocar al medio ambiente. Para normalizar este concepto la *International Standard Organization* desarrolló un Informe Técnico: ISO/TR 14062:2002(es), para la “Integración de aspectos ambientales en el diseño y desarrollo de productos”. Permitía su integración en documentos específicos sobre productos, centrándose en el ciclo de vida, la comercialización y el uso final por parte del consumidor, pero este informe no podía ser utilizado con propósitos de certificación y registro. Casi diez años después, se publicó la norma ISO 14006:2011 “Directrices para la incorporación de ecodiseño”, lo que significó la creación de la primera norma internacional de gestión ambiental, la cual proporcionó “directrices para ayudar a las organizaciones a establecer, documentar, implementar, mantener y mejorar de forma continua su gestión del ecodiseño como parte de un sistema de gestión ambiental (SGA)”. Por último, estas directrices fueron actualizadas y reemplazadas, publicándose así la ISO 14006:2020(es). Estas directrices tienen el objetivo de que los productores evalúen los impactos en el medio ambiente de sus productos a lo largo de la cadena de valor, además controlar su correcta gestión y tratamiento.

Principio 2: Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos. → Los sistemas circulares permiten que los componentes duraderos, primero sean reincorporados a la cadena de valor recuperándolos sin variar su forma o su función. En segundo caso, si ocurre que el producto se encuentra dañado y necesita una reparación, se hablaría de renovación o remanufactura. Como tercera opción, puede suceder que el producto no pueda ser usado para su función inicial y, es entonces, cuando se utilizan los componentes del producto para volver a fabricar otro. A veces, el material aprovechado puede adquirir un alto valor en el proceso, incluso mayor que el original, apareciendo así el “*upcycling*”. Por último, llega el final de vida útil del producto, tratándose del último escalón en el proceso de valorización. En este caso la mejor opción para poder aprovechar todos los componentes del producto es el reciclaje.

Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando el diseño los factores externos negativos → Mediante la reducción de daños al uso humano, poniendo especial énfasis en aquellos factores que tienen conexión con alimentos, vivienda, transporte, salud, ocio y educación.

Por otro lado, y una vez expuestas las bases que definen las líneas de pensamiento y objetivos fundamentales de la Economía Circular, Porcelli y Martínez (2018) establecen una serie de características esenciales que funcionan a modo de requisitos:

- a. Los residuos se eliminan en el diseño (residuo = recurso).
- b. La energía que impulse esta economía debe ser renovable y, además, debe generarse solidez mediante la diversidad.
- c. Pensar en sistemas donde los vínculos se tienen en cuenta constantemente
- d. Los precios deben ser reales.
- e. Nueva relación entre consumidor y producto, donde el usuario no se apropia de él, sino que paga por su servicio. Cuando dicho servicio finaliza, el producto es retirado por la empresa para reincorporarse al ciclo productivo.

Las redes colaborativas, fomentadas por usuarios de diversas redes sociales, pero también blogs, aplicaciones móviles y otros sistemas de información o comunicación, pueden ser un impulso a la Economía Circular. Esto es posible el cambio en la mentalidad colectiva permite que los productos sean arrendados, alquilados o compartidos en la medida de lo posible. Lo cual sugiere que es fundamental seguir buscando y actualizando posibles vías que se puedan sumar para alcanzar los objetivos de esta filosofía circular.

Este nuevo enfoque le da especial importancia al diseño del producto, como se menciona anteriormente, propiciando el inicio del fin de la economía lineal también denominada “de la cuna a la tumba” (*from cradle to tomb*) en la que el producto acaba en un vertedero. Es entonces cuando el ecodiseño obtiene la importancia que merece y se le otorga el objetivo de llegar a recuperar la mayor parte de los componentes de los productos para que puedan convertirse en una nueva materia prima o producto directamente. En el caso de la energía fotovoltaica, este tipo de diseño está centrado en la investigación de la reducción del tamaño de los paneles fotovoltaicos, ya sea en lo referido a su superficie o al espesor de sus láminas manteniendo o mejorando, eso sí, la eficiencia energética y la durabilidad. Además, la recuperación del mayor porcentaje de componentes, una vez finalizada su vida útil, se optimiza facilitando el desmontado y separación de piezas para su posterior reutilización o reciclado.

Es también importante relacionar el proceso productivo con el enfoque de la “triple R” en el cual se aplican las ideas de reducir, reutilizar y reciclar. De esta forma es posible adoptar un ciclo donde se incluyan todas las etapas, ya que éstas van de la mano. Como se presenta en la Figura 4 y como se ha comentado previamente en este estudio, todas las fases del proceso productivo y sus diferentes pasos pueden ser optimizados con el objetivo de facilitar la recuperación o reciclado final y, reducir el volumen de residuos que alcanzan dicho paso:

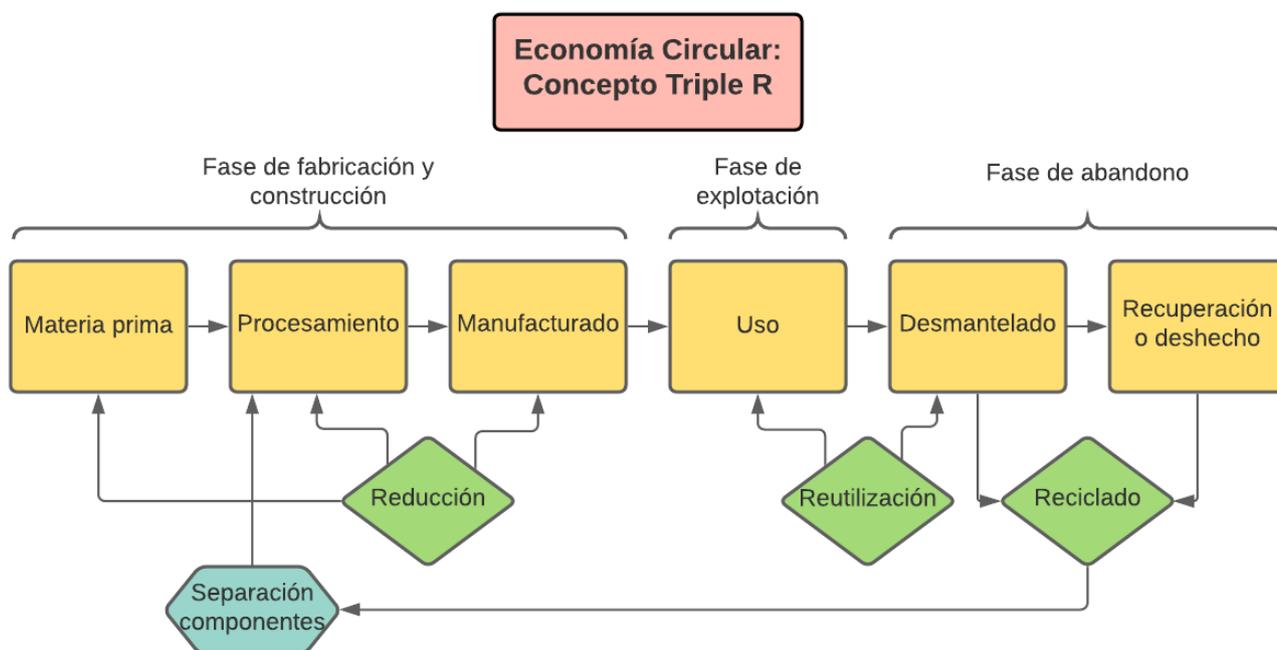


Figura 4. Esquema productivo Economía Circular. Fuente: realización propia.

Se puede observar que la reducción interviene principalmente en la extracción de materias primas, el procesamiento y el manufacturado o fabricación, influyendo en la mejora del diseño del producto y reduciendo de esta forma el consumo de materias primas. Además, de esta manera se facilita el desarrollo de las fases posteriores y la recuperación de materiales, una vez han cumplido su ciclo útil. La reutilización, por otra parte, está vinculada a las etapas de uso y desmantelado, donde es importante nombrar la existencia de un mercado de módulos fotovoltaicos reutilizados, los cuales tienen un precio reducido debido a que ya han sido usados previamente, o en ciertos casos, a su menor rendimiento porque han sufrido algún tipo de fallo, pero que sigue siendo posible utilizarlos para producir energía. Por último, se encuentra el reciclado, donde paneles solares que no han podido ser reutilizados son transportados, almacenados y tratados para la correcta separación de sus componentes.

Estos tres conceptos son los pilares fundamentales en las investigaciones centradas en desarrollar la energía fotovoltaica para introducirla en el sistema de la Economía Circular y abandonar o, al menos, tratar de reducir la generación de residuos no valorizables.

Todo esto conlleva cambios no sólo sistemáticos sino sociales, ya que es necesario un cambio de mentalidad, tanto en administraciones y empresas, como en los consumidores en general. Se debe producir una modificación en los patrones de consumo y los modelos de economía lineal basados en la filosofía del usar y tirar que, como consecuencia, quedarán obsoletos. De esta forma, se podría avanzar hacia una sustitución de una economía individualista por otra más colaborativa con valores y modelos que apoyen el intercambio, la asociación o el alquiler, entre otros.

Esta visión es necesaria, pero la generación de residuos varía en función del área (por ejemplo, las industrias alimentaria, renovable, electrónica, etc) y esto, provoca que las investigaciones y tecnologías asociadas a la valorización de los residuos generados evolucionen a diferentes ritmos. Por tanto, crear una red compleja y heterogénea de gestión de residuos, es hoy en día un gran reto debido a que la generación de dichos residuos y la dificultad para tratarlos y reutilizarlos es muy variable en cada área. En lo que atañe a la energía fotovoltaica, se han hecho muchos avances en la recuperación, tratamiento y reciclado de sus componentes, pero en algunos casos todavía los costes son elevados y los flujos de residuos reducidos, como ampliaremos más adelante.

Por otra parte, el término “valorización” de residuos ha de ser definido, ya que es la idea en la que se basa este estudio. Según la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 se entiende como “*cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general*”. Por consiguiente, la valorización de residuos está directamente relacionada con el concepto de la Economía Circular y dependen la una de la otra. A raíz de la publicación de esta Directiva se inició un proceso de transposición a la legislación de los diferentes países miembros de la UE y, en el caso de España, se implantó en forma de Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Esto supuso un punto de inflexión debido a la aparición por primera vez en la legislación española de los conceptos de “subproducto” y “fin de la condición de residuo”. Según la citada ley, una sustancia u objeto podrá ser considerada como subproducto, y no como residuo, cuando se cumplan estas cuatro condiciones simultáneamente:

- 1) Que tenga la seguridad de que la sustancia u objeto va a ser utilizado posteriormente.
- 2) Que la sustancia u objeto se pueda utilizar directamente sin tener que someterse a una transformación posterior distinta de la práctica industrial habitual.
- 3) Que a sustancia u objeto se produzca como parte integrante de un proceso productivo.
- 4) Que el uso posterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos, así como a la protección de la salud humana y del medio ambiente, sin que se produzcan impactos generales adversos para la salud humana o el medio ambiente.

1.3 Problemática económica y ambiental en la gestión de los residuos fotovoltaicos generados

En términos generales, se da por hecho que las energías renovables no tienen ningún tipo de incidencia sobre el medio ambiente y el ser humano, pero cuando se analiza, la composición y la peligrosidad de los residuos que forman parte de los paneles so-

lares fotovoltaicos, es fácil llegar a la conclusión de que es necesaria una sistematización en el tratamiento de estos residuos y un cambio de paradigma económico para poder convertir un modelo económico lineal en una Economía Circular. Por consiguiente, para conseguir estos objetivos es imperativo solucionar problemas tanto económicos como ambientales que dificultan la gestión de este tipo de residuo:

Económicos

La economía, como en todos los ámbitos, es fundamental para desarrollar cualquier proyecto. En el caso de la gestión de residuos fotovoltaicos, es fundamental desarrollar tecnologías tanto de diseño como de tratamiento, además de poder calcular, o en su caso estimar con la mayor exactitud posible el volumen de residuos que se van a producir en un periodo determinado. Existen varias cuestiones importantes:

- Dificultad y elevados **costes** a la hora de reutilizar y/o reciclar elementos potencialmente peligrosos. Las tecnologías necesarias para llevar a cabo el ciclo de reciclaje, suponen un encarecimiento del proceso por lo que sólo sería eficiente aplicado a un flujo elevado de residuos para rentabilizar la inversión.
- **Trabas legislativas.** Paulatinamente, esta cuestión se está tomando más en consideración por las nuevas regulaciones para favorecer el desarrollo y la inversión de la energía solar fotovoltaica. Como se aprecia inicialmente en la Figura 2, tras la crisis económica del año 2008, en España no se apostó por las energías renovables. Mientras que la normativa europea es la que ha impulsado este tipo de industria.
- Inexactitud al calcular el **flujo de residuos** fotovoltaicos que se van a producir debido a la amplia variabilidad: se puede esperar un mínimo, pero si no se analiza en profundidad, podemos encontrar un elevado volumen de residuos e insuficientes instalaciones para valorizarlos. Según la IRENA (Agencia Internacional de la Energía Renovable) se pueden tener en cuenta dos tipos de escenarios: el escenario de pérdida normal, donde se asume que el tiempo de vida de los módulos solares es de 30 años y no existe ningún desgaste; mientras que el escenario de pérdida temprana tiene en cuenta los posibles fallos durante la fase de explotación (antes de 30 años), ya sean al inicio, a la mitad o por desgaste (Weckend et al., 2016).
- Búsqueda de **inversores**: debido a la variabilidad antes comentada, es difícil encontrar inversores que no cuenten con subvenciones de la Unión Europea o de España. Además, la situación económica tras el Covid-19 augura un panorama similar al vivido en 2008 con la crisis global, con la diferencia de que en la actualidad la energía fotovoltaica está más extendida y desarrollada que en esa época.

La solución para que sea económicamente viable sin un flujo elevado de residuos, sería crear un centro de recuperación con capacidad de procesar diferentes tipos de residuos fotovoltaicos (multinúcleo) (D'Adamo et al., 2017). Es cierto que tanto el coste como la contaminación asociada al transporte sería un problema para esta idea, pero cabe la posibilidad de utilizar una red de almacenaje descentralizada para que el transporte de los componentes sea viable, estableciendo un volumen mínimo para realizar el transporte al centro de tratamiento.

Ambientales

Los problemas ambientales derivados del incorrecto tratamiento de los residuos a nivel mundial, es una cuestión que necesita una solución prioritaria, ya que es difícil cuantificar el impacto total que este hecho provoca sobre el medio ambiente. Asimismo, la tecnología fotovoltaica es relativamente nueva y empieza a producir un nuevo tipo de residuo con un incremento exponencial, por lo cual, es necesario tener en cuenta varias consideraciones:

- A la hora de **recolectar y transportar** paneles fotovoltaicos que han llegado al final de su vida útil, se puede producir también una contaminación excesiva si no se crea un plan de recogida adecuado.
- Se debe disponer de un **sistema de almacenamiento** adecuado para los componentes de módulos solares que sean potencialmente peligrosos. Actualmente hay muchos casos en los que no se realiza ningún tipo de gestión especializada con paneles solares que están llegando a vertederos.
- El **tratamiento** de los componentes de paneles que no han podido ser reutilizados, bien como paneles de segunda generación, bien como componentes de repuesto, producen emisión de polvos tóxicos y gases durante el proceso, además de contaminación acústica. Esto es resultado, entre otros, del aplastamiento y trituración del vidrio durante su reciclado y, de los tratamientos térmicos y químicos obligatorios para la separación de los componentes de los módulos fotovoltaicos.

1.4 Ventajas de la valorización de los componentes y su relación con la economía circular

Como se ha comentado anteriormente, la Economía Circular supone un cambio radical tanto en los sistemas de consumo como de producción, abriendo un amplio campo de actuación para la valorización de residuos en general, y en el campo de la energía solar en particular. A continuación, se enumeran diferentes ventajas tanto para el ser humano como para el medio ambiente relacionadas directa o indirectamente con la valorización de los componentes pertenecientes a paneles solares fotovoltaicos:

- **Reducción de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en vertederos**, lo que implica necesariamente la reducción del riesgo de lixiviación de metales pesados al medio y, por tanto, la reducción del riesgo tanto para el medio ambiente como para el ser humano.
- **Reducción en la extracción de materia prima**. Actualmente existe una creciente problemática ambiental relacionada directamente con la producción de módulos solares, entre otros. Un ejemplo de ello lo tenemos en la minería, una forma de explotación muy perjudicial para el medio ambiente puesto que, si no se realiza una buena evaluación de impacto ambiental y una debida prevención, puede provocar graves lixiviaciones al subsuelo debido al aumento de la superficie de rocas fraccionadas que se

encuentran expuestas a los elementos, produciendo de esta forma la posible aparición de un drenaje ácido de minas (AMD), alterando así el pH del ecosistema tanto acuático como terrestre.

En este sentido, a nivel global la reutilización y reciclado de los componentes de módulos fotovoltaicos provocarán una reducción de la demanda de determinadas materias primas y, la consiguiente desaceleración de la extracción minera de plata, aluminio, estaño y cobre (al menos la destinada a esta actividad). Por ejemplo, la industria fotovoltaica consume entre el 3,5 y el 15% de la plata producida a nivel mundial, lo cual, a esa escala se traduce en grandes cantidades de plata que pueden verse reducidas drásticamente si la tecnología para su valorización se convierte en aplicable y accesible (Berry, 2014).

Además, la demanda de ciertos elementos y su situación limitada y/o de difícil acceso geográfico provoca tensiones geopolíticas entre los países interesados en dichos recursos. Por otra parte, es necesario tener en cuenta que la disponibilidad de ciertos materiales que se encuentran en “escasa” cantidad en la corteza terrestre, no es un problema que pueda afectar a corto-medio plazo, pero es fundamental implementar políticas que se anticipen a dicha situación extrema.

Por tanto, la limitación de los recursos naturales, como base de todas las energías renovables y de la Economía Circular, es una buena razón para tratar de recuperar y reciclar la mayor cantidad de componentes de paneles fotovoltaicos posibles.

- La **generación de gases** la valorización de materiales fundamentales para la energía fotovoltaica como el aluminio, es significativamente menor que en la extracción de la materia prima original. Hasta un 95% menos aproximadamente (Ding, 2012). Además, las emisiones en la valorización de otro tipo de elementos como el galio o el indio, supone una gran reducción en cantidad de carbono emitido como se explicará en el siguiente capítulo de este trabajo.

La generación de silicio es un proceso que requiere el consumo de grandes cantidades de **energía**. Este consumo se reduce significativamente, hasta una tercera parte, cuando el silicio es recuperado de módulos fotovoltaicos en comparación con su extracción y manufacturado desde cero (Choi y Fthenakis, 2010). Significa que la recuperación de este elemento no sólo evita impactos en su extracción, sino que, además, reduce gastos energéticos importantes en su producción, lo cual también tiene un impacto positivo sobre la contaminación generada.

1.5 Objetivos del trabajo

El presente trabajo fin de Máster está centrado en estudiar y analizar cómo la Economía Circular puede ser aplicada a la energía solar fotovoltaica. Se trata de una forma de integrar diferentes sistemas para así poder desarrollar una gestión que permita interconectar fases, convirtiendo la cadena de producción en un ciclo más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Para analizar este modelo económico y su aplicación a la energía fotovoltaica, es necesario alcanzar los siguientes subobjetivos:

- Revisar el estado del arte relacionado con la Economía Circular en el sector de la energía renovable fotovoltaica.
- Revisar legislación actual sobre el tratamiento del material procedente del desmantelamiento de plantas fotovoltaicas.
- Caracterizar, cuantificar y evaluar los residuos generados por la energía solar fotovoltaica y las vías de valorización actuales más importantes.

Dicho análisis se va a realizar mediante una completa revisión bibliográfica que servirá para mantener un seguimiento de la evolución de los residuos de origen fotovoltaico, generados tanto a nivel internacional como a nivel nacional y local. Así como los impactos generados por los mismos.

Además, se va a revisar si la legislación está adaptada al incremento de la generación residuos y los nuevos objetivos por la Agenda 2030. El aumento de estos residuos implica por otra parte la necesidad de crear modelos de gestión eficientes que minimicen el impacto sobre el medio ambiente y favorezcan la creación de valor y la recuperación de materias primas.

Este estudio surge de la idea de que las energías renovables se están desarrollando a gran velocidad y a escala industrial, lo que sugiere que existirá un futuro en el que se generen grandes cantidades de residuos con origen en dichos sistemas energéticos. Por tanto, para que estas energías sean totalmente renovables, es necesario que cuando dichos sistemas lleguen al fin de su vida útil, deben poder valorizarse todos sus componentes. Teniendo en cuenta la huella de residuos que están comenzando a dejar las energías renovables y, más en concreto la energía fotovoltaica, parece imperativo la reducción de dicha huella no sólo a través del desarrollo de nuevas tecnologías que impliquen módulos fotovoltaicos menos nocivos y más fácilmente reciclables, sino, además, es necesaria la optimización de los métodos de valorización de los módulos más antiguos (los que pueden generar más problemas en la actualidad). Estos importantes objetivos pueden ser asequibles mediante la aplicación del modelo de Economía Circular a la cadena de producción.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización de los residuos generados por la energía solar fotovoltaica

2.1.1 Tipos de tecnologías fotovoltaicas

La energía solar se ha convertido en uno de los recursos energéticos naturales con más posibilidades de explotación, ya que se obtiene de manera respetuosa con el medio en comparación con las fuentes energéticas convencionales (como la combustión de combustibles fósiles). Las células solares fotovoltaicas se encuentran en constante evolución debido a la continua investigación en avances tecnológicos centrados principalmente en su optimización. En este sentido, la generación de residuos una vez concluida la vida útil de los distintos módulos fotovoltaicos, debe ser analizada y marcará sin duda las pautas para la creación y desarrollo de nuevos modelos.

Dicha evolución no es casualidad, sino que es fruto de multitud de investigaciones a nivel mundial que se centran en la mejora del rendimiento, así como la resistencia y flexibilidad de sus materiales, que permitan alargar su vida útil (Kim et al., 2021; Venkateswari y Sreejith, 2019). Pero también es importante enfocar objetivos que resulten en el uso de materiales menos o nada nocivos para el medio ambiente.

Antes de empezar a hablar de las diferentes tecnologías que componen el parque fotovoltaico mundial, es necesario contextualizar el objetivo del desarrollo de este tipo de energía, para así poder observar cuáles pueden ser las hojas de ruta para un futuro próximo en la valorización de sus residuos.

Existen diferentes tipos de generaciones de células fotovoltaicas Green (2002). Las diferencias principales entre estas generaciones serán la eficiencia energética, los materiales utilizados para la fabricación de paneles y el tamaño de dichos paneles, el cual se está viendo reducido con las mejoras tecnológicas y el paso de los años. Se pueden elegir diversos tipos de tecnologías fotovoltaicas y, según la elegida por la empresa, serán necesarios diferentes tratamientos debido a los diversos materiales que componen los paneles.

La tecnología más usada es la que se basa en el **silicio (c-Si)** (Figura 5) y es considerada como la primera generación. Es posible encontrarlo en varias formas: monocristalino (mono-Si), policristalino (poli-Si), en cinta o amorfo (a-Si). A pesar de ser la más usada, según la Agencia Internacional de Energía Renovable (Weckend et al., 2016), el uso de este tipo de células solares tendrá un decrecimiento de aproximadamente el 28% durante la década de 2020. Por este motivo, podemos agrupar esta tecnología en la primera generación de células fotovoltaicas.

El panel de tipo monocristalino ha superado en 2019 al de tipo policristalino debido a que los costes para la investigación y optimización de su eficiencia son más asequi-

bles (Europe, 2020). Por otra parte, en cuanto a instalaciones antiguas, el tipo monocristalino es el más extendido ocupando alrededor de dos tercios de las instalaciones globales, donde España no es una excepción. Esta circunstancia lo convierte en el tipo de panel que genera un mayor flujo de residuos, al menos durante las primeras dos décadas (2030-2050), desde las que vamos a empezar a contar debido al aumento de residuos de origen fotovoltaico (Weckend et al., 2016).

Es importante tener en cuenta que, en un panel fotovoltaico, aproximadamente el 93% de su masa se encuentra constituida por cristal/vidrio (70%), polímeros (5%) y aluminio (18%), los cuales son fácilmente reutilizables o reciclables, encontrándose clasificados además como residuos no peligrosos. Mientras que otro 6% puede provocar complicaciones a la hora de su reciclado porque existe un mayor grado de dificultad a la hora de separar sus elementos, como el silicio (3,65%), el fluoruro de polivinilo (1,5%) perteneciente al recubrimiento posterior, la plata (0,05%) y, en menor medida, estaño y plomo (<0,05%). Por otra parte, también se cuenta con 1% de cobre perteneciente a las conexiones (Latunussa et al., 2016). En la Figura 5 se muestra de forma fragmentada los componentes principales antes descritos.

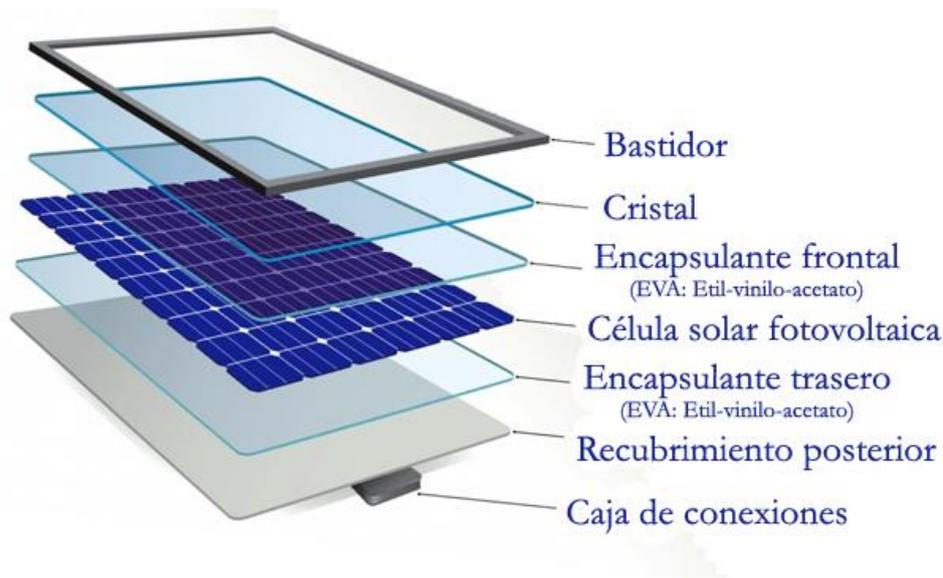


Figura 5. Estructura panel fotovoltaico c-Si. Fuente: www.senergia.es

Por otro lado, encontramos la tecnología basada en **película fina** (Figura 6) o de segunda generación, que se divide en las compuestas por células de cobre, indio, galio y selenio (**CIGS**); y las que se componen por telurio de cadmio (**CdTe**).

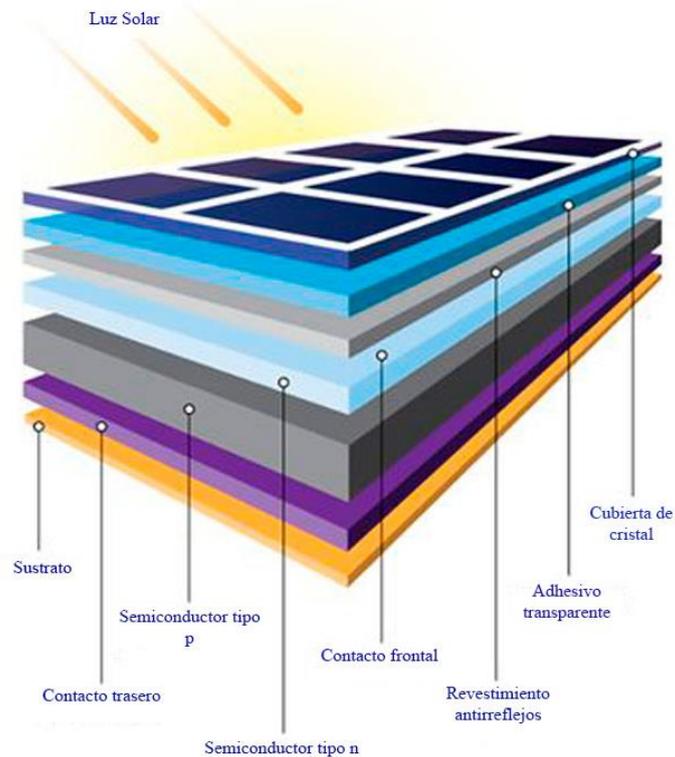


Figura 6. Estructura panel fotovoltaico de película fina. Fuente: www.dexen.mx

Este tipo de módulo fotovoltaico está siendo mucho más usado en la actualidad, y se prevé que en el uso de las CIGS continúe su expansión debido a su alto rendimiento. Los paneles de película fina contienen un 98% de cristal/vidrio (en su mayoría), aluminio y polímero, los cuales se clasifican como residuos no peligrosos. Pero, por otra parte, contienen un 2% de cobre y zinc, que sí son potencialmente peligrosos para el medio ambiente. Además, el gran problema de este tipo de tecnología es el tratamiento de ciertos componentes minoritarios como son el galio, selenio, telurio de cadmio y plomo, cuando llega el final de su vida útil (Weckend et al., 2016).

Por último, la tercera generación de paneles fotovoltaicos abarca desde la tecnología de concentración fotovoltaica (CPV) hasta nuevas tecnologías emergentes como las células solares sensibilizadas con colorante o células orgánicas (OPV), células híbridas y silicio cristalino avanzado (*advanced c-Si*) entre otras.

A continuación, en la Figura 7 se muestra un gráfico sobre los componentes de los paneles fotovoltaicos en cuanto a su proporción respecto a la masa del módulo y diferenciados por tecnologías, además de la estimación de la evolución de dichos componentes con el paso de los años y el desarrollo de otras tecnologías:

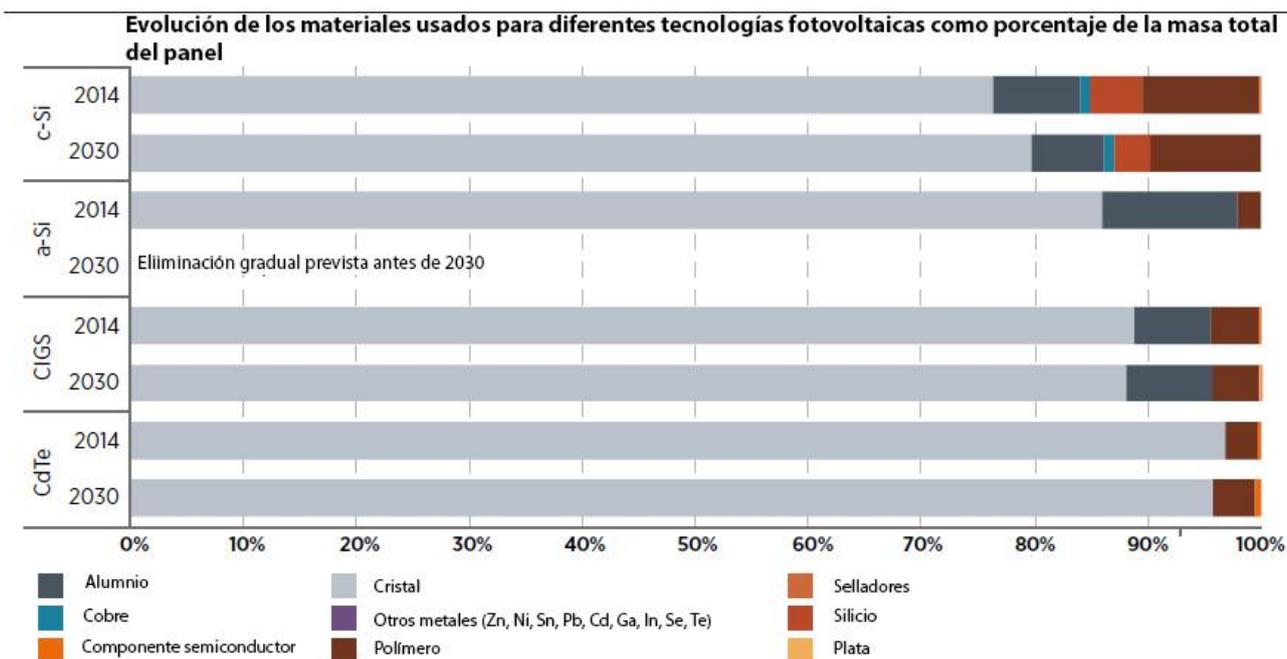


Figura 7. Evolución de materiales de distintas tecnologías a nivel mundial. Fuente: Weckend et al., 2016. Traducido al español

Se observa una reducción leve en la tecnología c-Si del uso de aluminio, el cual que genera diversos impactos durante su fase de extracción. Además, el material encapsulante (etilvinilacetato) también tendrá menos presencia, lo que supone una mejora para el tratamiento de los paneles una vez hayan llegado al fin de su vida útil. En cambio, el material más fácilmente reciclable, que es el vidrio, va a experimentar un aumento en su porcentaje de la masa total del panel.

Por otra parte, la tecnología de CdTe presenta una disminución en el uso de vidrio y un incremento del uso de polímeros llamados duroplásticos, similares a la fibra de vidrio. Este material presenta una especial resistencia a su valorización, lo cual se explicará más adelante. Además, la disminución del grosor de la capa de telurio de cadmio y la adición de una capa entre los metales en contacto posterior y el paquete semiconductor, provocará la presencia de otros materiales, como el telurio de zinc (ZnTe). Esto resulta en la reducción de la difusión del cobre en el semiconductor y, por lo tanto, la degradación a largo plazo (Strevel et al., 2013).

Mientras, los CIGS principalmente van a presentar mayor cantidad de aluminio alcanzando un 8% del peso total en 2030.

2.1.2 Funcionamiento de las células fotovoltaicas

Las células solares de silicio cristalino (m-Si y p-Si) han sido las más utilizadas, como se menciona previamente. Esto se debe a su elevada eficiencia, propiciada por el

poder semiconductor del silicio. Pero, este material debe ser dopado mediante la adición de fracciones de otros materiales (impurezas) con el objetivo de mejorar su conductividad. El silicio en estado puro posee cuatro electrones de valencia, que comparte con átomos vecinos y, al agregarle otros materiales con más electrones de valencia se modifican sus propiedades conductoras (García-García et al., 2012). Existen dos tipos de dopajes del silicio:

- Tipo negativo (tipo-n): se produce al añadir impurezas de fósforo (P). Posee cinco electrones de valencia, lo que significa que, al estar rodeado de átomos de silicio, el quinto electrón quedará ligado de una forma débil (carga negativa libre). Esto produce un incremento de la conductividad del silicio.
- Tipo positivo (tipo-p): se produce al añadir trazas de boro (B). Sólo presenta tres electrones de valencia que, al unirse con el silicio, deja libre un “hueco”. Este será aprovechado por los electrones para moverse de uno a otro, aumentando la conductividad del silicio.

La célula solar está formada por la unión de estos semiconductores, apareciendo la llamada unión p-n, donde los electrones del dopaje tipo-n detectan los huecos libres del dopaje tipo-p y, viajan para llenarlos formando el par electrón-hueco (Figura 8). Entonces, cuando un fotón (luz solar) es capaz de golpear un par, separa los componentes de dicho par generando una corriente eléctrica (García-García et al., 2012).



Figura 9. Generación de corriente eléctrica en la interfaz de la unión p-n. Fuente: García-García et al., (2012).

Se da el caso de que no todos los portadores que aparecen en este proceso contribuyen a la generación de corriente eléctrica, sino que una fracción elevada se recombina y genera calor. Esto es lo que condiciona la eficiencia de conversión de la célula solar, siendo utilizada como parámetro para establecer la calidad de la célula. Actualmente se obtienen con una eficiencia del 20% aproximadamente, por lo que existe un gran margen de mejora (García-García et al., 2012).

2.2 Clasificación y ciclo de vida de los residuos

El objetivo principal de la clasificación de residuos y, más en concreto los que son de origen fotovoltaico, es tener en cuenta los riesgos que pueden afectar tanto a la salud humana como al medio ambiente, originados por los materiales provenientes de una instalación fotovoltaica que ha llegado al fin de su vida útil.

Para ello es necesario considerar la composición de los materiales que se van a desechar y sus propiedades, dado que cada uno tiene diferentes interacciones con el medio. Por tanto, a partir de un análisis previo se pueden tomar medidas para la gestión, el tratamiento y/o la contención de los residuos que se estimen como una amenaza potencial debido a la composición de metales de los paneles fotovoltaicos y su lixiviación. De acuerdo con el estudio de Nain y Kumar (2020), es fundamental tener en cuenta que el almacenamiento de residuos de paneles fotovoltaicos en vertederos conlleva un riesgo elevado para el medio ambiente ya que sus componentes potencialmente peligrosos, aun siendo minoritarios, pueden ser lixiviados e introducidos en el ecosistema terrestre. Por esta razón, se ha legislado para regular la concentración máxima de componentes peligrosos que lixivian en un fragmento de panel roto, cuyo proceso fue relatado con anterioridad.

Por otra parte, los elementos que componen cada tipo de módulo fotovoltaico varían según la tecnología. Lo cual implica que los paneles de silicio cristalino pueden originar diferentes impactos en el medio ambiente que los paneles de película fina. Las de silicio tienen un rendimiento más limitado, por lo cual ahora se está invirtiendo en la instalación de tecnologías fotovoltaicas de tipo CdTe, que poseen un rendimiento más elevado, pero cuyos módulos fotovoltaicos están formados por elementos potencialmente más nocivos para la salud (plomo), (Nain y Kumar, 2020). Estos elementos, además, tienen altos rangos de lixiviación de compuestos peligrosos (cadmio, selenio) en condiciones ácidas. Este hecho no supone un problema en la actualidad porque todavía no se están generando residuos de este tipo de tecnología, pero es importante tenerlo en cuenta para la planificación futura.

Existen diferentes metodologías para la clasificación residuos procedentes de paneles solares, pero los más utilizados son los estudios mediante lixiviación, donde se exponen a un líquido fragmentos de un panel roto durante un periodo de tiempo determinado, midiéndose a posteriori las concentraciones de las sustancias de interés. Dichas sustancias se encontrarán disueltas en un líquido denominado “eluat”. Este tipo de estudios se encuentra delimitado por la normativa española, donde los requisitos para llevar a cabo la toma de muestras se encuentran en la norma UNE-EN 14899:2007 “Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo” y, las pruebas de lixiviación para condiciones especificadas están recogidas en la norma UNE-EN 12920:2007+A1:2009 “Caracterización de residuos. Metodología para la determinación del comportamiento en la lixiviación de residuos en condiciones especificadas”. Estas son normas técnicas europeas adoptadas y armonizadas en el marco normativo español por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

La actualización de la legislación española a los nuevos sistemas económicos y ambientales requieren una revisión de sus anexos y una renovación de sus clasificaciones, en concreto, las de aparatos eléctricos y electrónicos.

La “Guía de declaración de los aparatos puestos en el mercado ante el Registro Integrado Industrial”, dispone una nueva clasificación de AEE (Aparatos Eléctricos y Electrónicos) implantada por el Real Decreto 110/2015, en la cual se presentan más categorías que permitan una gestión más específica de los mismos. En dicha guía, se engloba dentro de la categoría 7 a todos los paneles fotovoltaicos con una dimensión exterior superior a 50 cm (si las dimensiones son menores, se clasifican dentro de la categoría 5) y se dividen en dos subcategorías: paneles fotovoltaicos con silicio (código LER: 160214-71) declarados no peligrosos y paneles fotovoltaicos con telurio de cadmio (código LER: 160213*-72*) declarados como peligrosos. Esta clasificación tiene como objetivo crear diferentes condiciones de almacenamiento para cada tipo de residuo.

El **principio de jerarquía de residuos**, promueve la reducción de la cantidad de residuos generados (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). Prioriza, en la legislación y la política, la prevención y la gestión de los residuos, como establece el art. 4.1 de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos; más conocida como Directiva Marco de Residuos (DMR) (Puentes Cociña, 2018). Para explicar este principio, se desarrolla una pirámide jerárquica (Figura 9) donde se exponen las prioridades a la hora de enfrentarse a la gestión de residuos:



Figura 10. Pirámide Jerarquía de Residuos. Fuente: Directiva 2008/98/CE.

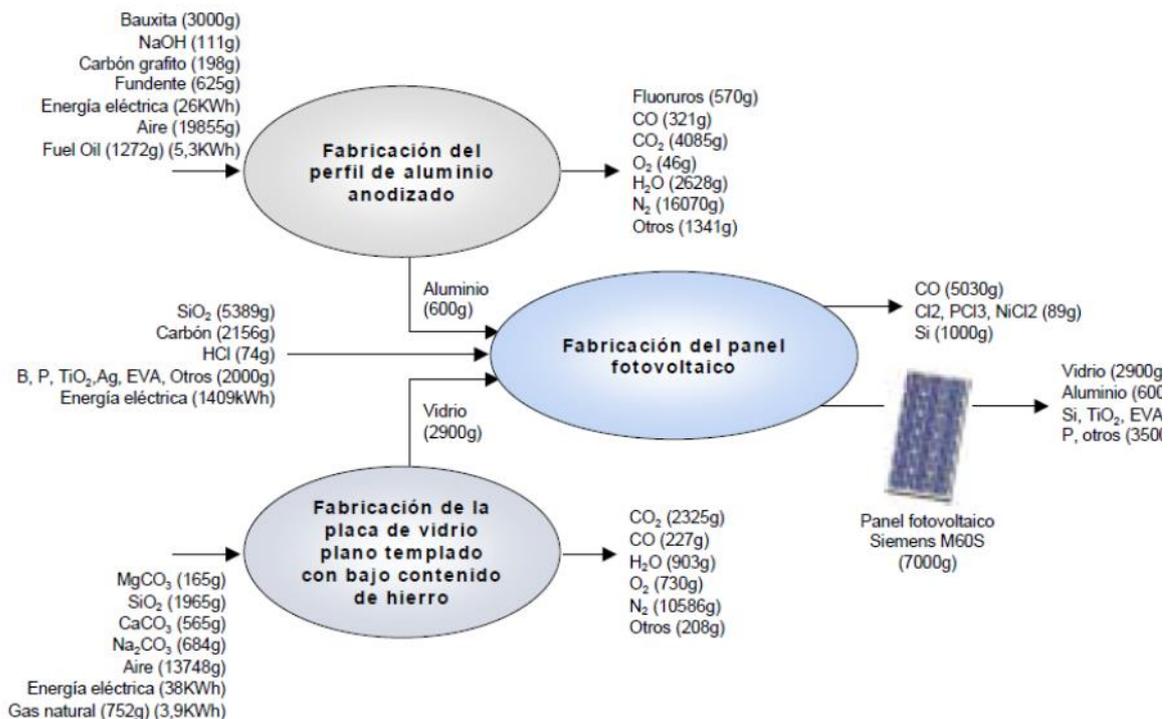
Es importante tener en cuenta que, tradicionalmente se han concentrado los esfuerzos relacionados con el tratamiento de residuos en el final del ciclo productivo cuando, para realizar una gestión optimizada, sostenible y más viable económicamente hablando, sería más adecuado atender también al inicio del ciclo productivo. Es decir, una mejor selección de las materias primas y procesos de producción, puede conllevar

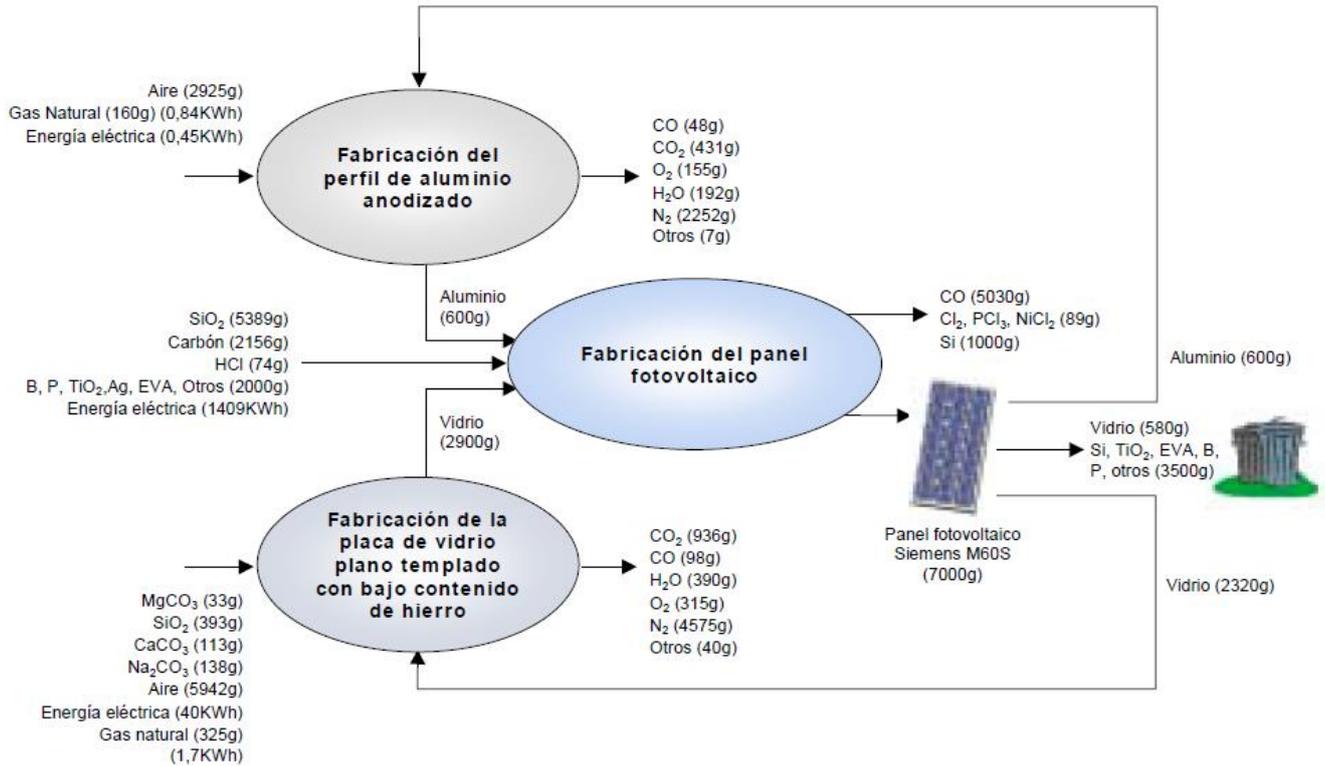
una correcta prevención y minimización de los residuos que se van a generar. De esta forma se van a facilitar las etapas posteriores, reutilizando o reciclando más eficazmente. Mediante este método, se pretende que la fracción que alcance la etapa de deshecho sea lo menor posible.

Por otra parte, en cuanto al ciclo de vida de un panel fotovoltaico, está constituido, por la fase de extracción, fase de explotación y fase de abandono. La clasificación de este tipo de residuos busca mejorar la unión de todas las fases y, si es posible, prolongar la fase intermedia. El análisis del ciclo de vida (ACV) busca estudiar el impacto de cada una de estas etapas sobre el medio ambiente.

Como se observa en las Figuras 10 y 11, el reciclado “únicamente” del aluminio y el vidrio de los componentes de un módulo fotovoltaico de tamaño pequeño (pesa sólo 7 kg, cuando la media es de 22 kg), tiene un impacto importante tanto sobre el ciclo de vida de un producto, como sobre las materias primas consumidas y la contaminación generada. En concreto, la recuperación total de esos dos materiales supondría un ahorro en la extracción, ya que se obtendrían 600 g de aluminio y 2320 g de vidrio, lo que se traduce en obtener el 41,7% de las materias primas iniciales.

Esta comparativa ofrece una visión clara de lo que supondría optimizar el reciclado de los componentes de un módulo solar fotovoltaico





La extrapolación de los datos (Figura 11) da una idea de lo que puede suponer la recuperación de miles de toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos, tanto ambientalmente como económicamente. Se produce una reducción considerable en la generación de CO₂ (Figura 12) cuando se fabrican perfiles de aluminio anodizado y placas de vidrio templado a partir de componentes recuperados:

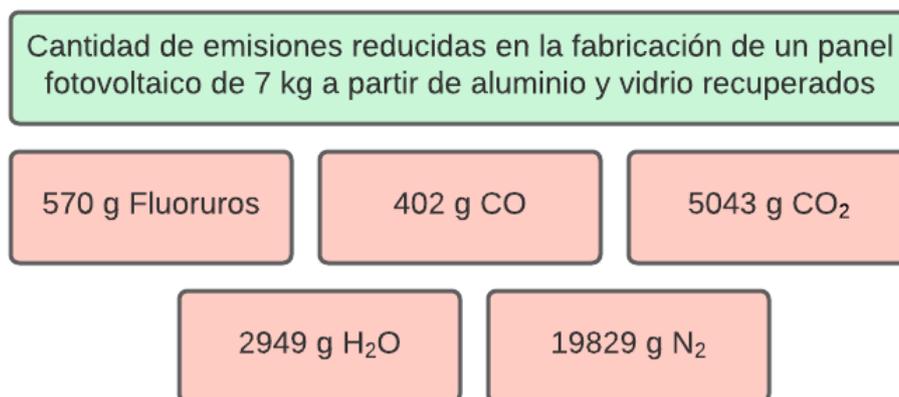


Figura 11. Cálculos realizados a partir de la fuente Kim et al., 2000.

Estos datos reflejan la comparación entre las Figuras 10 y 11, donde se pueden hallar las diferencias de emisiones cuando no se produce la recuperación de las fracciones

de aluminio y vidrio y, cuando sí se produce. Se ha realizado una suma de las emisiones totales de cada compuesto, y luego se ha podido hallar la diferencia entre las emisiones sin y con recuperación.

Si los datos ofrecidos en el esquema se consideran a escala nacional, y se tiene en cuenta que la proyección de generación de residuos en España es de 90000 toneladas (t) para el año 2030; y teniendo en cuenta que el aluminio y el vidrio constituyen el 88% de la masa total de los paneles fotovoltaicos de silicio, se obtiene que alrededor de 79200 t serán únicamente de estos dos materiales mencionados. Por tanto, tomando la hipótesis de que el total de esos materiales fueran recuperados, esto supondría una reducción de emisiones sustancial de aproximadamente:

- 6500 t fluoruros
- 4500 t CO
- 57100 t CO₂
- 33400 t H₂O
- 224300 t N₂

Estos datos son un supuesto teórico en un escenario en el que se produce una recuperación completa tanto de los paneles como del aluminio y el vidrio que los componen. Como es sabido, en ningún proceso se obtiene una eficiencia del 100%, pero su fin es servir como ejemplo para demostrar el gran impacto que puede provocar la valorización de los residuos de origen fotovoltaico.

Por otra parte, el ACV es una herramienta esencial usada para investigar cada impacto directo o indirecto a lo largo de las etapas del ciclo de vida de un producto (Sherwani y Usmani, 2010). El objetivo de un ACV es cuantificar las entradas de recursos materiales y energéticos, así como las salidas de desechos y contaminantes en la producción de un producto o servicio. Así, por ejemplo, es posible evaluar parámetros como el tiempo de recuperación de la inversión energética (E_{PTB} : *energy pay-back time*), que se refiere al periodo de tiempo necesario para que el sistema produzca la misma cantidad de energía utilizada para su producción, incluyendo no sólo etapas iniciales como el procesado, manufacturado o instalación sino, además, el mantenimiento y desmantelado final (Sumper et al., 2011).

De forma adicional, el Cradle-to-Cradle Products Innovation Institute administra desde 2010 un programa de certificación sin ánimo de lucro, responsable de otorgar la etiqueta con el objetivo de mantener la transparencia y apertura del proceso de certificación, el cual se encuentra actualmente en su tercera versión (V3). Se trata del Certificado C2C (The Cradle to Cradle Certified®) (MBDC LLC, 2012).

Este proceso requiere la evaluación de los productos según los principios C2C resumidos en cinco criterios fundamentales que deben ser respetados:

- 1) Salud del material: los productos C2C están fabricados con materiales no tóxicos. Si un componente tóxico no puede ser reemplazado, entonces debe estar bien encapsulado para poder ser reutilizado al final de la vida útil del producto.

- 2) Reutilización del material (*up-cycling*): implica un ciclo cerrado, donde los materiales fluyen repetidamente sin pérdida de valor y calidad. La reciclabilidad del material es fundamental para lograr tasas eficientes de reutilización.
- 3) Administración del agua: el uso del agua en los procesos industriales debe ser controlado y eficiente. Es necesario evitar la contaminación del agua.
- 4) Gestión de las Energías Renovables y el Carbón: maximizar el uso de fuentes de energía renovables y promover el uso eficiente de la energía.
- 5) Justicia Social: la planificación y el diseño siempre deben tener en cuenta las condiciones sociales y económicas locales donde están integradas las instalaciones industriales.

2.3 Cantidades estimadas de residuos

En la actualidad se puede apreciar un incremento de grandes plantas fotovoltaicas y de autoconsumo (las primeras en mayor medida) tanto a nivel mundial, como europeo y español. España, experimentó un incremento muy elevado en 2019, como ya comentamos anteriormente, el mayor de la Unión Europea. A pesar de esto, debemos fijar nuestro objetivo unos años atrás, dado que el tiempo de vida media de un módulo fotovoltaico es de 25-30 años, y este estudio pretende investigar sobre el flujo actual de residuos de origen fotovoltaico.

Por tanto, sobre el año 2030 existirá una abundante cantidad de residuos de origen fotovoltaico en el continente europeo, donde fueron pioneros en este tipo de instalaciones; y aproximadamente en el 2045, esta generación de residuos será mucho mayor también a nivel mundial, debido al incremento de plantas a gran escala entre los años 2008 y 2015.

Global

A nivel global, el tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) ha empezado a ser una cuestión prioritaria dada la alta densidad de consumo de este tipo de productos que se está llevando a cabo hoy en día. Hasta ahora, se han utilizado países en vías de desarrollo con legislaciones más laxas y menos controles medioambientales como “vertedero”, pero debido al significativo incremento de la población mundial y, por tanto, del consumo de este tipo de productos, se está generando un flujo de residuos muy superior e insoportable para el ser humano. Esto ha llevado la situación a un punto de inflexión en el cual el tratamiento de dichos residuos, ya sea para su reutilización o para su reciclado, se ha vuelto obligatorio.

Existen dos escenarios de previsión de flujo de residuos fotovoltaicos, los cuales se basan en la literatura y han sido creados en base a una distribución de Weibull acu-

mulada (Weckend et al., 2016). Este método tiene en cuenta la probabilidad de pérdidas para valorar dicho flujo, donde el factor forma (α) determina la probabilidad de pérdidas durante el ciclo de vida del panel fotovoltaico.

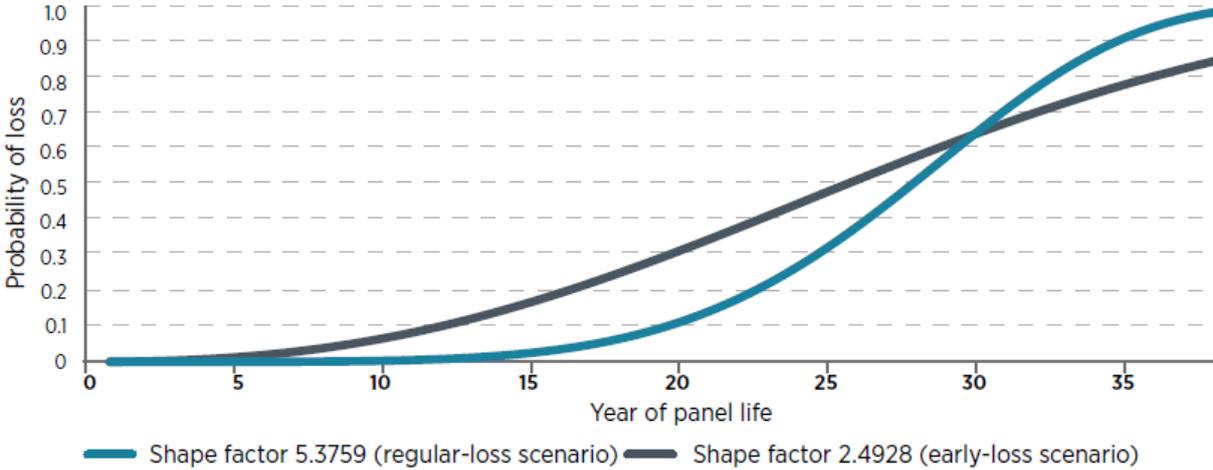


Figura 12. Función de Weibull. Fuente: Weckend, 2016.

En primer, lugar, tenemos en cuenta el escenario de pérdida temprana (*early-loss scenario*), el cual es más exhaustivo ya que incluye un mayor número de factores que pueden fallar y una alta probabilidad de pérdida a lo largo del ciclo de vida; mientras que en el escenario de pérdida regular (*regular-loss scenario*) no incluye posibles fallos iniciales como la instalación o el transporte, ni los primeros 15 años. Como se aprecia en la Figura 13, es a partir de dicho número de años cuando la probabilidad de pérdida comienza a incrementar en el caso de la pérdida regular. Para cada escenario, el valor de probabilidad de fallo (α) se multiplica según la función de Weibull por el peso de los paneles instalados en un año determinado. Dado que se utiliza un valor alfa mayor en el escenario de pérdida regular, la curva asciende suavemente y se cruza con la curva del escenario de pérdida temprana en el punto de vida nominal de 30 años (Figura 13) (Weckend et al., 2016). Esta probabilidad de pérdida se calcula a partir de la ecuación:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^\alpha}$$

Donde:

t = tiempo en años

T = tiempo de vida media

α = factor forma

Mediante esta función es posible determinar los factores necesarios para el cálculo de los distintos escenarios y, además, permite optimizar la previsión del momento en el que se van a generar los residuos.

Por otra parte, las distintas tecnologías fotovoltaicas en las que se centra este estudio (c-Si y CdTe) poseen una proporción de degradación muy similar en condiciones estándar, pero cuando el clima varía la incidencia de fallos también lo hace, debido a que los diferentes agentes atmosféricos pueden dañar los módulos fotovoltaicos y exponerlos a la lluvia y, los lixiviados resultantes podrían alcanzar fácilmente ambientes terrestres y acuáticos cercanos (Tammaro et al., 2016).

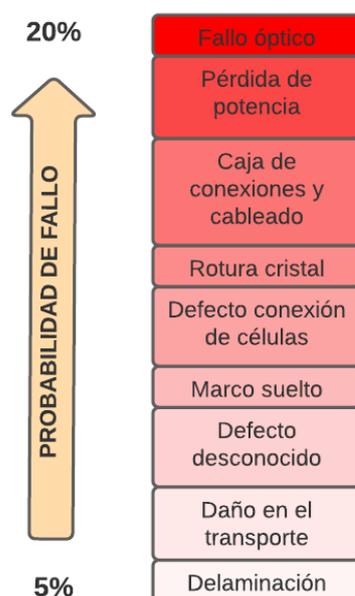


Figura 13. Tasa de fallo según las quejas de los clientes.
Fuente: Weckend et al., 2016. Realización propia.

En la Figura 14 se muestra la probabilidad de fallo tanto de los diferentes componentes como de rendimiento y, ha sido realizada mediante las reclamaciones realizadas por los clientes. El clima puede influir de forma notable en distintos fallos (sobre todo relacionados con pérdida de potencia), pero la mayor parte de estos se origina durante el transporte y la instalación.

La IRENA estima que la generación de residuos a nivel mundial de origen fotovoltaico alcanzará en 2030 unos 28 millones de toneladas acumuladas, mientras que en el año 2050 podría alcanzar la cifra de 78 millones de toneladas, lo cual indica la necesidad de empezar a gestionar el tratamiento de dichos residuos (Weckend et al., 2016).

En general, la mayoría de países como Canadá, Estados Unidos, Alemania, Japón, Reino Unido, Francia, China, Corea y España invierten en el desarrollo de “Dispositi-

vos adaptados para la conversión de la energía de radiación en energía eléctrica”(Paulo et al., 2018), pero una colaboración más extendida entre los mismos es fundamental para, por ejemplo, repartir competencias en materia de gestión e investigación para el tratamiento de los residuos resultantes, adaptándolas a las posibilidades de cada uno.

En la Tabla 1 se muestran datos extraídos de los objetivos mínimos de recogida separada de RAEE previstos por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental para el año 2021 en España. Según expresa la resolución, estas estadísticas “han sido calculadas a partir de los datos recibidos del Registro Integrado Industrial del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, sobre los aparatos eléctricos y electrónicos puestos en el mercado en los años precedentes, y deberán cumplirse en cada comunidad autónoma en proporción a su población, según los últimos datos disponibles del Instituto Nacional de Estadística a 31 de diciembre del año precedente”.

OBJETIVOS MÍNIMOS ESTATALES Y AUTONÓMICOS DE RECOGIDA SEPARADA DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE) PARA EL AÑO 2021				
	Tipo de residuo	Objetivos uso doméstico (kg)	Objetivos uso profesional (kg)	Objetivos totales (kg)
Objetivos Mínimos estatales para el año 2021	Panales fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	-	70.873.635,97	70.873.635,97
	Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	67.139.957,31	12.599.865,33	79.739.822,64
Objetivos Mínimos Andalucía para el año 2021	Panales fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	-	12.642.645,59	12.642.645,59
	Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	11.976.621,11	2.247.600,67	14.224.221,78

Tabla 1. Objetivos mínimos de recogida de RAEE en España. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021).

Las estimaciones muestran que la recogida mínima de paneles fotovoltaicos grandes alcanzará aproximadamente las 71 toneladas a nivel estatal para el año 2021, mientras que solamente en la comunidad autónoma de Andalucía se espera una recogida mínima de 14 toneladas. Por otro lado, también se representan los pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm) debido a que engloban a los pequeños aparatos con paneles fotovoltaicos integrados. La representación de esta categoría puede ser despreciable por el momento, debido a la baja densidad de pequeños paneles fotovoltaicos integrados en aparatos. Aun así, si los nuevos diseños de aparatos continúan en ese ritmo, es una categoría que habrá que tener en cuenta en un futuro cercano para procurar su correcta valorización.

Desde otro ángulo, la evolución en la generación de residuos se puede apreciar de forma precisa, por ejemplo, observando el volumen de residuos procedentes de paneles fotovoltaicos de c-Si y de CdTe en Italia (Tablas 2 y 3).

Years of waste production	Tons	Waste composition										
		Glass	Frames (Aluminium)	EVA	Backing film (Tedlar)	Adhesive, potting compound	Silicon	Copper	Tin	Lead	Zinc	Silver
2012	563	417	58	37	20	7	19	3	1	0	1	0
2017	307	228	32	20	11	4	10	2	0	0	0	0
2022	839	622	86	55	30	10	28	5	1	1	1	0
2023	102	76	11	7	4	1	3	1	0	0	0	0
2024	82	61	8	5	3	1	3	0	0	0	0	0
2025	51	38	5	3	2	1	2	0	0	0	0	0
2026	99	74	10	6	4	1	3	1	0	0	0	0
2027	198	147	20	13	7	2	7	1	0	0	0	0
2028	397	294	41	26	14	5	13	2	0	0	0	0
2029	457	339	47	30	16	5	15	3	1	0	1	0
2030	661	490	68	43	24	8	22	4	1	0	1	0
2031	1215	901	125	80	44	14	41	7	1	1	1	0
2032	3558	2639	366	233	128	41	119	20	4	2	4	0
2033	32,785	24,313	3377	2147	1180	380	1098	187	39	20	39	2
2034	67,048	49,723	6906	4392	2414	778	2246	382	80	40	80	3
2035	216,534	160,582	22,303	14,183	7795	2512	7254	1234	260	130	260	11
2036	903,059	669,709	93,015	59,150	32,510	10,475	30,252	5147	1084	542	1084	45
2037	332,528	246,603	34,250	21,781	11,971	3857	11,140	1895	399	200	399	17
2038	110,852	82,208	11,418	7261	3991	1286	3714	632	133	67	133	6
Total (2012–2038)	1,671,336	1,239,463	172,148	109,473	60,168	19,387	55,990	9527	2006	1003	2006	84
2045	1,389,286	1,030,295	143,096	90,998	50,014	16,116	46,541	7919	1667	834	1667	69
2050	1,783,268	1,322,472	183,677	116,804	64,198	20,686	59,739	10,165	2140	1070	2140	89
Total (2012–2050)	4843891	3,592,229	498,921	317,275	174,380	56,189	162,270	27,610	5813	2906	5813	242

Tabla 2. Estimación de cantidad de residuos generados de paneles tipo c-Si hasta el año 2050 en Italia. Fuente: Paiano (2015)

Years of waste production	Tons	Waste Composition							
		Glass	Polymers (e.g. EVA)	Cadmium	Tellurium	Aluminium	Copper	Zinc	
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2025	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2026	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2027	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2028	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2029	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2030	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2031	51	48	2	0	0	0	1	0	0
2032	149	142	5	0	0	1	1	0	0
2033	2784	2645	97	2	2	10	28	0	0
2034	7195	6835	252	5	5	25	72	1	1
2035	23,493	22,318	822	16	16	82	235	2	2
2036	76,695	72,861	2684	54	54	268	767	8	8
2037	27,941	26,544	978	20	20	98	279	3	3
2038	14,592	13,863	511	10	10	51	146	1	1
Grand Total (2012–2038)	152,901	145,256	5352	107	107	535	1529	15	15
2045	464,743	441,506	16,266	325	325	1627	4647	46	46
2050	634,973	603,224	22,224	444	444	2222	6350	63	63
Grand Total (2012–2050)	1,252,617	1,189,986	43,842	877	877	4384	12,526	125	125

Tabla 3. Estimación de cantidad de residuos generados de paneles tipo CdTe hasta el año 2050 en Italia. Fuente: Paiano (2015)

Es posible observar que la generación de residuos de tipo c-Si sigue una proyección ascendente desde el año 2023 (en años previos se encuentran flujos de residuos con origen en sistemas fotovoltaicos defectuosos o de baja calidad). Mientras que los paneles de tipo CdTe comenzarán a originar residuos en cantidades importantes a partir del año 2031. Todo ello se puede apreciar en las Tablas 2 y 3, donde se desglosan las toneladas totales generadas por año, y las toneladas generadas de cada tipo de componente.

Estos datos demuestran que las instalaciones basadas en el silicio van a generar cuatro veces más residuos que las de telurio de cadmio. Por otro lado, es imperativo tener en cuenta que los compuestos que forman parte de cada tipo de tecnología no tienen relación en cuanto a su peligrosidad. Los elementos de los c-Si son valiosos y valorizables, y en su mayoría no representan una gran amenaza para el medio (exceptuando el plomo), mientras que los CdTe tienen cadmio, que puede suponer un gran peligro para el medio ambiente y para el ser humano. Entonces, las dos tecnologías mencionadas van a producir dos vertientes en las que hay que poner especial atención: una en la cual se van a producir grandes cantidades de residuos fotovoltaicos no peligrosos fácilmente valorizables y, otra en la cual no se van a generar grandes volúmenes de dichos residuos, pero será necesario gestionarlos y almacenarlos con extremo cuidado.

País	2015	2016	2017	2018
Dinamarca	1	3	5	6
Alemania	:	2.032	1.000	2.259
España	:	0	24	353
Francia	366	223	1.885	1.555
Italia	:	:	:	11

Tabla 4. Residuos fotovoltaicos generados (Tn) en distintos países de la UE. Fuente: Eurostat (2020)

Los datos aportados por la Oficina Europea de Estadística (Eurostat), Tabla 4, indican un claro incremento de los residuos fotovoltaicos en España entre los años 2017 y 2018. En muchos casos se da, como en Alemania y Francia, que el volumen de generación fluctúa debido a los módulos fotovoltaicos defectuosos y que, por tanto, no alcanzan la vida media estimada para la mayor parte de instalaciones produciendo así variaciones en los datos. Al igual ocurrirá en España en los años posteriores, hasta que se empiecen a generar residuos fotovoltaicos procedentes de módulos que han alcanzado, el final de su vida útil sin que hayan sufrido fallos tempranos. Las estadísticas han sido creadas en función de las operaciones de gestión de residuos registradas, de lo que se deduce que no representa el volumen de residuos exacto que existe en cada país.

A principios del 2000, se comenzaron a construir plantas fotovoltaicas a gran escala en España. Esta inversión provocó un incremento tanto de las instalaciones, como de

la potencia instalada en el país. Por tanto, será necesario tener en cuenta este aspecto, ya que a partir del 2025 se espera una cantidad importante de residuos fotovoltaicos, debido a que no todos los paneles completan su esperanza estimada (25-30 años). Como analizan Santos y Alonso-García (2018), las instalaciones fotovoltaicas construidas en 2007-2008 han producido una generación temprana de residuos debido a la baja calidad de las mismas. Por tanto, a partir de la potencia fotovoltaica anual instalada corregida con las necesidades de repotenciación, obtuvieron que entre los años 2022 y 2027 se generarían unas 10.000 toneladas al año (de media), generadas por dichos módulos con un tiempo de vida inferior al normal. Esta generación alcanzaría su pico alrededor del año 2028.

Según la proyección más conservadora estimada por la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSO-E) en 2050 se espera que España produzca 90.000 toneladas, mientras que la proyección menos conservadora estimada por Bloomberg New Energy Finance (BNEF) calcula una generación de 140.000 de toneladas. Esto se traduce en que los residuos acumulados de origen fotovoltaico alcanzarán en dicho año entre 1 y 2 millones de toneladas.

2.4 Legislación

Para llevar a cabo un correcto análisis en cuanto a la valorización de los residuos generados en la industria fotovoltaica, se hace necesario un análisis pormenorizado de la legislación vigente relacionado con esta industria. En este ámbito, es importante tener en cuenta la legislación europea, ya que actualmente es la que está marcando el camino del tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Además, existe legislación española de obligado conocimiento para entender el contexto actual

Europa

El rápido crecimiento y alto despliegue de las tecnologías fotovoltaicas en Europa desde los inicios del 2000, ha remarcado la obsolescencia de antiguas iniciativas comunitarias, como la iniciativa voluntaria PV CYCLE, la cual fue creada en 2007 y consistía en una asociación entre reguladores europeos y la industria fotovoltaica, para investigar y colaborar en el reciclado de paneles fotovoltaicos. Debido a la alta densidad de productores, ha sido necesario crear normas generales para equilibrar la balanza del mercado y establecer condiciones equitativas para todos sus componentes asegurando, por otra parte, la recogida y tratamiento de residuos fotovoltaicos a largo plazo para crear un camino hacia la Economía Circular (Comisión Europea, 2014). Para reforzar esta nueva política tanto ambiental como productiva se tuvo que proceder a la creación de normas que apoyen ese enfoque:

- *Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de junio de 2011, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.*

Esta Directiva, también llamada RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*), pretende limitar las concentraciones de sustancias peligrosas en AEE para incrementar

la protección de la salud humana y el medio ambiente si estos no llegan a tratarse de una forma adecuada al final de su ciclo de vida. Entre estas sustancias, como ya hemos venido señalando, se encuentran metales pesados como el plomo o el cadmio, además de retardantes bromados como bifenilos polibromados (PBB) y éteres difenil polibromados (PBDE), usados en la producción de plásticos (Escuela, 2017).

Cabe mencionar la citada directiva provocó la derogación de la anterior Directiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de enero de 2003, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.

- *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*

“En lo que se refiere a los productos con un ciclo de vida largo y que ahora entran en el ámbito de aplicación de la presente Directiva, como los paneles fotovoltaicos, se deben aprovechar de la mejor forma posible los sistemas de recogida y valorización existentes, a condición de que cumplan los requisitos establecidos en la presente Directiva”.

Esta directiva es fundamental en este tipo de legislación, ya que establece un marco legal que delimita la responsabilidad ampliada de un productor de paneles fotovoltaicos. De esta forma influyen en las empresas pertenecientes tanto a los 27 países de la Unión Europea, como a la Comunidad Económica y los países que comercien con ella.

Una vez publicada la Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (WEEE Directive), al ser de aplicación directa, los países miembros de la UE crearon leyes para adaptarse a esta nueva norma. Así, en el plazo de dos años todos los países europeos la implementaron e iniciaron la regulación de la recogida, transporte y tratamiento (reutilización o reciclado) de los paneles fotovoltaicos que han llegado al fin de su vida útil. Dicha norma tiene como objetivo principal la recuperación y reciclado de hasta un 85% y un 80%, respectivamente, de todos los residuos generados de origen eléctrico o electrónico. Esto significa que de la fracción que no se pueda recuperar, se pretende reciclar un 80%. Pero para alcanzar dicha meta, es primordial la colaboración de empresas fotovoltaicas que favorezcan la monitorización y recolección de los módulos fotovoltaicos, llegando a recoger más del 60% de los equipamientos puestos en el mercado.

Previo a la publicación de esta directiva, la Directiva 2002/96, de 27 de enero de 2003, era la norma vigente hasta que quedó derogada debido a que sus objetivos debían ser actualizados para ajustarlos a las nuevas necesidades y metas en este ámbito.

España

Para sentar las bases de la legislación española en esta materia, es necesario tener en cuenta la situación contextual y las trabas que han sufrido las energías renovables y, más en concreto la energía fotovoltaica. *“No es ya factible que en un mundo donde*

el consumidor eléctrico ha dejado de ser cautivo, se le pueda seguir obligando a asumir cargas fiscales y parafiscales que no le corresponden. Políticos y reguladores necesitan aún internalizar esta lección, y legislar en consecuencia para que intereses sociales y privados estén alineados” (Ríos et al., 2017).

El desarrollo de esta industria renovable en nuestro país se ha visto afectada por los cambios políticos acontecidos en el país, como bien aclaran Espejo-Marín y Aparicio-Guerrero (2020): *“la producción de electricidad con energía solar fotovoltaica ha estado condicionada por la política energética del Gobierno de España, no siempre favorable a este tipo de energías”*. es importante ser cuidadoso a la hora de comparar España con otros países del mundo (China) y de la Unión Europea (Alemania), porque es necesario tener en cuenta las diferencias contextuales de cada país, valorando los factores tanto internos como externos.

Es cierto que, por otra parte, observando la situación actual se puede decir que se está dando una apertura legal desde aproximadamente el año 2017, provocando un expansionismo de la energía fotovoltaica reflejado claramente en el crecimiento de la potencia anual instalada en 2019.

En todo caso serán de aplicación todas las normativas que afecten a instalaciones solares fotovoltaicas, y en particular las siguientes:

- *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre*, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- *Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero*, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. En concreto el Anexo I, parte B, se refiere a las operaciones de valorización de residuos divididas en subcategorías.
- *La Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados*, enumera y define los residuos peligrosos (RP).
- *Real Decreto 110/2015*, sobre el tratamiento de los residuos con origen en equipamientos eléctricos y electrónicos (EEE). A partir del año 2018 el alcance de aplicación del Real Decreto se amplía (ámbito abierto). Es entonces cuando los residuos de módulos solares fotovoltaicos obtienen una categoría especial dentro de los residuos de equipamientos eléctricos y electrónicos (AEE: Aparatos Eléctricos y Electrónicos).
- *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio*, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Este Real Decreto define conceptos importantes sobre los residuos (inertes, municipales, biodegradables y líquidos entre otros), así como como el anteriormente mencionado principio de jerarquía de residuos, y establece una regulación y clasificación de los residuos con una visión más enfocada a la Economía Circular, a diferencia de la norma previa.

Una vez expuesta la legislación española relacionada con la valorización de los residuos de origen fotovoltaico, es posible deducir la influencia de la Unión Europea a partir del año 2015 con la publicación del Real Decreto 110/2015 (el cual debía haberse hecho efectivo el año previo, como indicaba la Directiva 2012/19/UE). Además, el hecho de que el 2019 fuera el año de mayor incremento de potencia acumulada en España, no quiere decir que la normativa avanzara al mismo ritmo, dado que fue un año marcado por cambios de Gobierno y el país estuvo dirigido en gran parte por un Gobierno en funciones que se encontraba muy limitado a la hora de legislar. Por tanto, no ha sido hasta 2020 cuando se ha podido empezar a crear normas para cumplir con los objetivos marcados por la comunidad europea.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Gestión de los residuos generados por la energía solar fotovoltaica

Existen diferentes posibilidades para que una empresa solar fotovoltaica pueda gestionar los residuos electrónicos que ha producido. En este caso, muchas empresas deciden registrarse por unas normas de estandarización que son de cumplimiento no obligatorio, pero recomendadas a nivel global cuando se trata de la voluntad de cumplir con las responsabilidades medioambientales, además de aportar valor añadido a las empresas que se acogen a dichas normas. Se trata de la ISO 14000 (International Standards Organisation), un conjunto de normas que abarcan la gestión ambiental y marca límites tanto para productos como para productores. Más en concreto, la **ISO 14040:2006** es la encargada de establecer los principios y marcos para la evaluación del ciclo de vida de los productos y operaciones de una compañía (ISO, 2006). Como ya se ha mencionado previamente, la Unión Europea posee regulaciones específicas sobre la gestión de paneles fotovoltaicos que han llegado al fin de su vida útil.

Cuando hablamos del tratamiento de RAEE de origen fotovoltaico, debemos tener en cuenta cuáles son los tipos de módulos más utilizados en Europa y en España: células de silicio (c-Si) y capa delgada (en concreto las de CdTe). El siguiente paso es clasificar los componentes de dichas tecnologías según su peligrosidad y su dificultad para ser reciclados, teniendo en cuenta los costes que conlleva el tratamiento del residuo. El estudio de los costes e ingresos es, hoy en día, parte de los cimientos para poder desarrollar cualquier tipo de proyecto. En este caso, como describe la IRENA, los costes de tratamiento se pueden dividir en tres sistemas interconectados (Weckend et al., 2016):

- Sistema físico de acumulación, almacenamiento, tratamiento, recuperación, reciclado y, si no puede evitarse, eliminación:
 - Acumulación: se colectan paneles solares que han terminado su vida útil en diferentes puntos de generación de residuos y, se transfieren a una localización centralizada.
 - Almacenamiento: los residuos son separados según grupos de materiales (metales, cristales, plásticos, etc).
 - Tratamiento: cada flujo diferenciado de materiales debe ser procesado para su posterior reutilización y reciclado. En este paso, se necesitan separar los materiales potencialmente peligrosos ya que éstos impiden el reciclado.
 - Eliminación: se trata del material que no ha podido ser reusado o reciclado.
- Sistema de procesamiento: donde se calcula la cantidad de materiales recuperados del proceso de reciclado, y los consiguientes costes e ingresos.

- Sistema de financiación y gestión: es el encargado de analizar los costes de operación de un sistema de RAEE (e-waste) para paneles fotovoltaicos.

Además, es fundamental crear un modelo de cuotas dirigido a las partes interesadas en financiar este tipo de tratamiento específico. Como propone la Directiva 2012/19/UE, *“la Directiva 2002/95/CE ha contribuido eficazmente a la reducción de las sustancias peligrosas contenidas en AEE (Aparatos Eléctricos y Electrónicos) nuevos, en los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) seguirán estando presentes durante muchos años sustancias peligrosas como el mercurio, el cadmio, el plomo, el cromo hexavalente y los policlorobifenilos (PCB), así como sustancias que reducen la capa de ozono. Los componentes peligrosos contenidos en los AEE constituyen un problema importante durante la fase de gestión de los residuos y el grado de reciclado de RAEE es insuficiente. La falta de reciclado provoca la pérdida de recursos valiosos”*.

Por ejemplo, el Estudio de Gestión de Residuos realizado por Gas Natural Fenosa Renovables para su planta fotovoltaica en Las Jaras de Badajoz en 2017, hace hincapié en los residuos generados durante la fase de construcción y la de demolición, pero no tiene en cuenta los residuos peligrosos y no peligrosos presentes en los paneles fotovoltaicos, o al menos, no los menciona específicamente. Por tanto, dicho estudio se refiere a la generación de residuos a corto-medio plazo, sin considerar la posibilidad de que los módulos fotovoltaicos que alcancen el final de su vida útil constituyan un problema. A su vez, el Estudio de Impacto Ambiental no desarrolla de forma específica la posible afectación de un incorrecto almacenamiento de módulos fotovoltaicos, limitándose a desarrollar las fases de construcción, explotación y desmantelamiento. Únicamente se consideran los residuos peligrosos utilizados durante la obra y generados por maquinaria u otras actividades. Tan solo se nombra en el Control N° 20 que, para evitar la posible contaminación de suelos y cursos de agua como consecuencia de accidentes, se debe garantizar que los residuos sean gestionados de acuerdo con lo especificado en la legislación vigente. Dicho control forma parte de las medidas preventivas, correctoras y minimizadoras de la fase de construcción, y surge en respuesta a un impacto detectado previamente.

Esto pone de manifiesto la escasa gestión específica de los paneles fotovoltaicos al alcanzar el final de su vida útil, y la necesidad de incluir protocolos para su correcto almacenamiento y transporte en el desarrollo de proyectos de plantas fotovoltaicas a gran escala.

Es importante contar con diferentes estrategias que tengan en cuenta la mayor parte de los posibles factores que incidan en la generación de futuros flujos de residuos electrónicos (RAEE) y, que puedan servir para la creación de una red de seguimiento y previsión. Una de ellas es la **creación de redes de monitorización** en parques fotovoltaicos para poder estimar el flujo potencial de residuos de origen fotovoltaico que van a ser generados con el paso del tiempo (Weckend et al., 2016). Es un buen método para controlar y predecir el volumen de residuos que se van a producir, y actuar en consecuencia. Sirve como mecanismo de anticipación para que se puedan planificar las futuras necesidades en el tratamiento de todos o la mayor parte de los residuos. Porque a partir de esta monitorización, se pueden estimar volúmenes de residuos en otras instalaciones fotovoltaicas de condiciones similares.

De esta forma se podrá estimar de forma más concreta, el desarrollo de la energía fotovoltaica en España y, por consiguiente, los residuos que se empezarán a generar en el año 2030 aproximadamente. El mayor obstáculo al que se enfrentan estas redes de monitorización son los paneles individuales de autoconsumo en hogares debido a su elevada dispersión en el territorio.

3.2 Opciones de Valorización de los residuos fotovoltaicos a nivel internacional

La valorización de los residuos fotovoltaicos se ha convertido en una cuestión apremiante debido a que los flujos de este tipo de residuos van a verse incrementados de forma exponencial debido al fin del tiempo de vida útil de las primeras grandes plantas fotovoltaicas construidas (mayoritariamente en Europa). Este tipo de instalaciones son en su gran mayoría de tipo c-Si, por tanto, esta sección se va a centrar en sus posibilidades de reducción, reutilización y reciclado.

	Componentes	Porcentaje (%)	Dificultad reutilización/reciclado
c-Si	Vidrio (<1% de antimonio)	70	Baja
	Marco de aluminio	18	Baja
	EVA (polímero encapsulante)	5,1	Alta
	Célula solar de silicio	3,65	Media
	Hoja posterior (fluoruro de polivinilo)	1,5	Alta
	Cables (cobre y polímeros)	1	Baja
	Conductor interno (aluminio)	0,53	Baja
	Conductor interno (cobre)	0,11	Media
	Plata	0,053	Media
	Otros metales (estaño, plomo)	0,053	Alta

Tabla 5. Distribución de componentes panel fotovoltaico de c-Si. Fuente: Xu (2018).

Cada componente presenta diferentes grados de dificultad a la hora de separarlos de forma efectiva del resto de elementos que se encuentran en un módulo solar fotovoltaico. La mayor dificultad para aislar un componente, como se desarrollará de ahora en adelante, está relacionada normalmente con la presencia de elementos potencialmente peligrosos que requieren un tratamiento muy especializado y cauteloso. Dicho proceso conlleva un incremento de los costes, pero al final del ciclo, son los que en teoría se ahorran a la hora de la extracción de las nuevas materias primas.

Como ya se ha mencionado, el proceso de reciclado no es económicamente rentable con el volumen de residuos actual, pero como demuestran las previsiones, lo será a

corto-medio plazo, lo que significa que las administraciones estatales e internacionales deben apoyar este tipo de tratamiento para que la inversión inicial sea factible y se puedan empezar a desarrollar plantas especializadas.

La valorización según el principio de las “tres R”:

Se han realizado muchos avances en cuanto a la valorización de residuos fotovoltaicos (RAEE), pero es importante tener en cuenta que los pasos previos a que estos sean considerados como tal son fundamentales en el proceso debido a que permiten la posibilidad de reducir el flujo de los mismos, además de reducir la cantidad de componentes potencialmente peligrosos o difíciles de tratar. Aquí es donde se debe desarrollar forma ordenada el concepto previamente mencionado de las “tres R”:

3.2.1 Reducción o sustitución

La investigación para la reducción del uso de materiales tales como el plomo, el estaño, o los polímeros encapsulantes, e incluso su sustitución por otros igualmente eficientes es continua. De esta forma, es posible reducir la cantidad de sustancias potencialmente peligrosas para facilitar así el almacenaje y tratamiento de los paneles fotovoltaicos defectuosos o que han llegado al fin de su vida útil.

Por ejemplo, los componentes poliméricos como los **encapsulantes (EVA)** y las láminas traseras no se pueden someter a tratamientos de reciclado debido a que la mayor parte de paneles existentes en el mercado tienen materiales duroplásticos formando estos componentes, lo que significa que no van a poder ser disueltos ni fundidos sin que se descompongan (Weckend et al., 2016). Esto indica que el primer paso por parte de los investigadores para mejorar la eficiencia del reciclado de los módulos fotovoltaicos, sería sustituir este tipo de materiales (Figura 15), apareciendo la posibilidad de usar poliolefina termoplástica (TPO) en lugar de usar el encapsulante tradicional de etileno-acetato de vinilo (EVA) (Adothu et al., 2019).

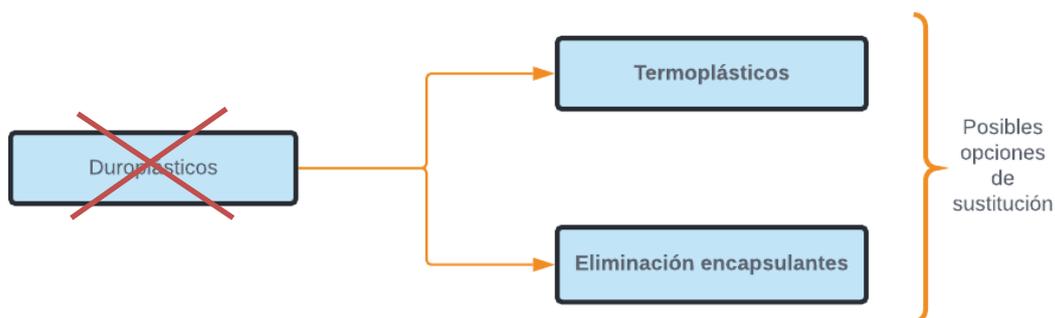


Figura 14. Posibilidades sustitución de duroplásticos. Fuente: realización propia

Esto presenta ventajas a la hora de permitir el tratamiento de los encapsulantes sin que se produzca degradación del material, debido a la exposición a la luz ultravioleta (foto-oxidación), elevadas temperaturas y una humedad relativa alta (Mansure et al., 2020).

Por tanto, esta sustitución o eliminación no sólo podría ser beneficiosa para el medio ambiente debido a la reducción de materiales no tratables que se destinan a vertederos, sino que además resulta en un beneficio económico tanto para el productor como para el gestor. La eliminación del proceso de separación de polímeros supondría la desaparición de uno de los pasos más complejos y costosos, lo cual se traduce en un gran avance en el ecodiseño, aproximándose así a un porcentaje de recuperación de materiales mayor.

Asimismo, no sólo es imperativo reducir componentes que conlleven una dificultad a la hora de ser recuperados, sino también aquellos que son potencialmente peligrosos para la salud humana y el medio, ya que se debe tener en cuenta la posibilidad de que los módulos fotovoltaicos no sean sometidos a un correcto almacenamiento y tratamiento de valorización. Esto quiere decir que, en este caso, los módulos de silicio cristalino deben ser fabricados con un menor porcentaje de plomo (Pb) durante la metalización y evitar totalmente su uso en las interconexiones de módulos soldados (CU-PV, 2016).

Finalmente, en cuanto a la reducción se trata, existen proyectos europeos como el Proyecto ECO-Solar (Alonso, 2019), el cual, cuenta con la colaboración de España, y se ha propuesto importantes objetivos en este ámbito:

- 1) Reducción del 80% de los residuos de silicio, mediante la reutilización del polvo de corte de este material para emplearlo como ánodo en baterías de silicio.
- 2) Reducción del uso de plata en un 66%.
- 3) Creación de patente de módulos NICE (*New Industrial Cell Encapsulation*), que no necesitan marco metálico ni usan encapsulantes (EVA), por lo tanto, se reduciría su peso y facilitaría el desensamblado.

3.2.2 Reutilización

Hay partes de paneles solares que pueden ser separadas “fácilmente” de forma mecánica como es la fracción del marco de aluminio o las láminas de vidrio, las cuales forman un alto porcentaje del material de cada módulo fotovoltaico. El **vidrio** en concreto, si es separado mecánicamente sin más tratamiento posterior puede contener impurezas (Latunussa et al., 2016). Por ejemplo, los residuos de pegamento o tornillos del vidrio de deshecho pueden imposibilitar o dificultar su venta con la misma finalidad (formar parte de un nuevo panel fotovoltaico). Por lo tanto, es necesario valorar si los costes del tratamiento térmico, químico y metalúrgico para eliminar dichas impurezas son menores que los de la producción de una nueva lámina de vidrio. Si la lámina de vidrio fuese descartada, existen otras funciones a las que podría ser destinada:

- Síntesis de geopolímeros a base de metacaolinita para la producción de hormigón. Esta investigación alumbra la posibilidad de que añadiendo un 10% de residuo de vidrio al geopolímero en una proporción de sólido a líquido de 1.0, este adquiere una resistencia a la compresión más alta (66,7 MPa). El aumento de esta resistencia, se debe al efecto del agua en el geopolímero que, facilita la mezcla y favorece el transporte iónico cuando se administra agua suficiente. Esa resistencia le confiere múltiples aplicaciones prácticas (Hao et al., 2013).
- Producción de baldosas cerámicas a partir del vidrio residual. Este método produce un material con más resistencia a la abrasión (erosión superficial) ya que el vidrio del panel solar promueve una fusión más efectiva del cuarzo, lo que lleva a una fase líquida más abundante y menos viscosa, lo cual acelera la cinética de sinterización (fabricación de piezas sólidas moldeadas). La abrasión de las baldosas sinterizadas sin y con cristal varió de 0,048 a 0,113, 0,023 a 0,115, 0,172 a 1,160, 0,096 a 0,696 y 0,005 a 0,049% a temperaturas de 800, 900, 1000, 1050 y 1100 °C, respectivamente. Esto quiere decir que la resistencia a la abrasión se incrementa con la temperatura. Además, una cantidad de vidrio residual del panel solar del 40% también aumenta dicha resistencia de la baldosa. Esto puede deberse a que el Al₂O₃ y el SiO₂ aumentan la resistencia a la abrasión de las baldosas. (Lin et al., 2015).

Observando las opciones y teniendo en cuenta la gran proporción de vidrio presente en cada módulo fotovoltaico, el desarrollo de diferentes técnicas para su valorización se antoja esencial en la relación entre energía fotovoltaica y Economía Circular. De momento, no sólo se pueden encontrar nuevas aplicaciones para componentes no reciclables, sino que dichas aplicaciones se pueden combinar. En este caso el vidrio puede suponer un aporte importante para la evolución de componentes estructurales. Normalmente la viabilidad de este proceso está directamente relacionada con la densidad de residuos fotovoltaicos que se estén generando, por lo cual, y como se ha mencionado anteriormente, será viable económicamente en pocos años y es urgente la creación de plantas especializadas a nivel europeo (debido a que fueron los pioneros) pero a también a nivel mundial.

Por otro lado, el marco de aluminio es reutilizable de forma sencilla, debido a que los paneles fotovoltaicos de una potencia determinada tienen un tamaño estándar relacionado con la optimización del rendimiento. En este caso ya tendríamos un 88% de la masa total del módulo fotovoltaico reutilizada, lo cual significa que la gran parte de los paneles es reutilizable. La problemática surge con los elementos que se encuentran en una proporción muy baja pero que tienen una peligrosidad elevada para el medio ambiente si estos acaban en vertederos y no son tratados debidamente.

Antes de 2005 las células solares se obtenían de paneles fotovoltaicos que habían llegado al final de su vida útil, y se reutilizaban en nuevos paneles. El problema de este proceso es que a menudo, las células se veían dañadas en la separación del resto de componentes (Huang et al., 2017).

3.2.3 Reciclado

Por otra parte, existe un último paso en el principio fundamental de la Economía Circular. Cuando no es posible reutilizar los componentes de un módulo fotovoltaico es imperativo su reciclado, bien para su uso con la misma finalidad, bien para su uso en otras áreas donde estos puedan ser igualmente aprovechados y se reincorporados al ciclo productivo, como muestra la Tabla 6.

Paso de reciclado	Proceso de reciclado	Materiales	Entradas (por m ₂)	Salidas
Delaminación	Pirólisis % (Frisson et al., 2000)	Electricidad	25 kWh	Vidrio, compuestos metálicos, obleas y EVA
	Disolución de solvente # (Doi et al., 2001)	C ₂ HCl ₃	46.2 kg	Vidrio, compuestos metálicos, obleas y EVA
	Tratamiento térmico * (Wang et al., 2012)	Electricidad	0,45 kWh	Vidrio, chips de celdas y cintas de metal
	Calentamiento electrotérmico # (Doni y Dughiero, 2012)	Electricidad	4,17 kWh	Vidrio, compuestos metálicos, obleas y EVA
	Solvente e irradiación ultrasónica # (Kim and Lee, 2012)	C ₆ H ₄ Cl ₂ Electricidad	46.2 kg 7,14 kWh	Vidrio, compuestos metálicos, obleas y EVA
	Disolución de ácido nítrico % (Bruton, 2020)	HNO ₃ Electricidad	46.2 kg 0.45 kWh	Vidrio, compuestos metálicos, obleas y EVA
Separación de materiales	Tratamiento químico * (Berger et al., 2010)	HNO ₃ HF CH ₃ COOH Br (gas)	5208 ml 3125 ml 3125 ml 62,5 ml	Vidrio, compuestos metálicos, celdas de Si

Tabla 6. Estado de los procesos de reciclaje de paneles c-Si a escala comercial*, piloto% y de laboratorio#. Fuente: Maani et al., 2020.

El reciclado del **vidrio** es el que más opciones ofrece, debido a la “facilidad” de su tratamiento y su elevada masa respecto al resto de materiales contenidos en un sistema fotovoltaico. Por ejemplo, las láminas de vidrio, si no pueden ser reutilizadas, se propone que sean procesadas en líneas de reciclado de vidrio, las cuales con una pequeña inversión pueden adaptarse para tratar este tipo de componentes. Se utilizaría un equipamiento compuesto por imanes, trituradoras, tamices, dispositivos de corrientes de Foucault (inducen un campo magnético para la separación de fracciones de aluminio), clasificadores ópticos, clasificadores inductivos y sistemas de escape. Tras ser sometido a este proceso, el vidrio triturado resultante sigue estando contaminado de elementos poliméricos, pero ya podría ser mezclado con otro vidrio reciclado para ser usado a modo de aislante térmico en industrias de espuma o fibra de vidrio, cerrando de esta forma el ciclo (Weckend et al., 2016). Eso sí, este método requiere de una gran inversión. Otro método propuesto por Granata et al., (2014) demuestra que el uso de un martillo tras la trituración, aumenta la eficiencia de recuperación de masa. Ésta técnica consiste en cuatro pasos: 1) trituración mediante dos rotores de cuchillas, 2) trituración mediante martillo, 3) tratamiento termal a 650 °C de las fracciones mayores a 1 y, 4) tamizado (tamiz de diámetro: d= 0,08 mm). Al final de estas

operaciones secuenciadas, el 85% del peso total de los paneles se puede recuperar (fracción de $d > 0,08$ mm) en forma de cristal, cumpliendo de esta forma con el objetivo mínimo de las Directrices Europeas de recuperación de masa. Mientras que la otra fracción ($d < 0,08$ mm) puede ser recolectada y tratada para una mayor recolección de silicio. Este método requiere menos inversión y se podría incluir fácilmente a una cadena de tratamiento, ya sea específica para cada componente (sistema descentralizado) o especializada en residuos fotovoltaicos (sistema centralizado).

Durante dicho tratamiento el vidrio corre el riesgo de sufrir “downcycling” (Kusch et al., 2017), lo que significa que se ha realizado un reciclado de bajo valor (low-value-recycling) y el material ha podido perder calidad y funcionalidad al extraer los materiales contaminantes (Deng et al., 2019). Por tanto, es imperativo dejar de utilizar plantas de reciclado de vidrio adaptadas para el reciclaje de vidrio procedente de paneles fotovoltaicos debido a que estas no podrán soportar el flujo que se va a generar a partir de la década de 2020-2030. Es posible pensar en la ampliación de estas plantas adaptadas, pero se debe tener en cuenta que el incremento de la generación de residuos, no se está produciendo únicamente en el sector fotovoltaico, sino en todos los ámbitos. En consecuencia, será necesario invertir en plantas especializadas que tengan una elevada eficiencia y poder evitar de esta forma el downcycling y la pérdida de valor.

En estas láminas de vidrio y en el encapsulante es donde se encuentra la mayor parte de materiales potencialmente peligrosos como el plomo, pero también es donde se pueden encontrar fracciones de elementos recuperables y altamente valiosos como son la plata o el cobre. Entonces, como se señala previamente, la separación y tratamiento del **encapsulante (EVA)** se ha convertido en uno de los mayores retos a la hora de reciclar los paneles fotovoltaicos. Existen varios métodos analizados que van a ser comentados en este estudio:

Según Chen et al., (2019), el método más eficaz para la separación del vidrio templado y el encapsulante es el tratamiento mediante disolventes orgánicos y tratamiento térmico posterior utilizado para la eliminación de impurezas restantes. Primero se aplican diversos disolventes orgánicos que serán elegidos según la temperatura y el tiempo de tratamiento. Los resultados demuestran que los dos disolventes más efectivos a 90°C son el tolueno y el d-limoneno. Como paso adicional para mejorar la efectividad del proceso se somete el panel a un tratamiento térmico con el fin de separar los restos de resina encapsulante todavía presentes. Dicha acción se realiza aumentando la temperatura hasta los 500°C , cuando se demuestra que al cabo de dos horas el porcentaje en peso del encapsulante se reduce casi totalmente a cero.

También existe la posibilidad de utilizar únicamente un disolvente orgánico como es el tricloroetileno (TCE) a una temperatura de 80°C durante 7-10 días, como se describe en estudios previos (Doi et al., 2001). Además, es necesario aplicar presión mecánica durante el proceso para evitar el hinchado del EVA, que extruirá. Luego, el EVA extruido se romperá por la fuerza de flotación debido a la diferencia de densidad entre el EVA y el tricloroetileno (las densidades del EVA y el tricloroetileno son 0,95 y 1,46, respectivamente).

Otros estudios coinciden en que el tratamiento mediante pirólisis es el método más eficiente para retirar el material polimérico en forma de encapsulante (EVA) y la mayor parte de la hoja trasera del panel fotovoltaico. Quedando de esta forma menos del 1%

en peso residual de la fracción EVA y, entre el 20 - 25% en peso residual de la fracción de la hoja posterior (Dias et al., 2017; Zeng et al., 2004; Farrel et al., 2019). Además, la pirólisis presenta una gran ventaja ya que no produce tanto CO₂ como la combustión directa, y promueve una limpia recuperación sin promover la oxidación química (Farrel et al., 2019).

La gran diferencia entre este proceso y el anterior es el tiempo y la temperatura y, por otra parte, los costes para desarrollar ambos tratamientos difieren debido al gran aporte energético necesario en el primer método. Aun así, existe la posibilidad de que sea factible si se crea un sistema de reciclado en cadena y se eleva el flujo de residuos. Además, este procedimiento debe realizarse correctamente debido a que la célula solar puede resultar dañada durante la separación.

Normalmente de forma consecutiva a este tratamiento se procede a la recuperación de **metales de alto valor**. Se trataría de silicio y demás elementos minoritarios como son los revestimientos de aluminio, plata, anti-reflectante (SiN_x) y conexiones p-n (encargadas de crear un campo eléctrico). El proceso se realiza mediante la aplicación de un tratamiento químico, como mencionan Klugmann-Radziemska y Ostrowski (2010). Para llevar a cabo la recuperación de dichos elementos el estudio de Huang et al., (2017) propone que tras el proceso de pirólisis del EVA se inicie un tratamiento químico para recuperar metales tales como la plata, el plomo, el estaño y el cobre. Este procedimiento se realiza mediante una lixiviación de dichos metales con la ayuda del ácido nítrico (HNO₃). Posteriormente, se recuperan de la disolución en dos pasos diferenciados. Primero se añade cloruro de sodio (NaCl) para que la plata pueda precipitar en forma de cloruro de plata (AgCl), el cual podrá ser tratado posteriormente para obtener plata. Además de esto, con ayuda de la técnica de electrodeposición es posible recuperar de la disolución el cobre, el plomo y el estaño (Yoo et al., 2012).

Es fundamental observar de forma específica cada célula solar para poder imaginar su división en diferentes componentes, como ilustra la Figura 17.:

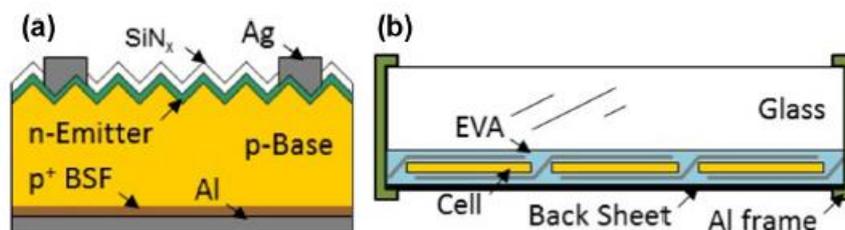


Figura 15. Estructura de una oblea de una célula solar de silicio cristalino (a) y estructura de un módulo solar fotovoltaico (b). Fuente: Huang et al., 2017.

Seguidamente se produce una separación de la capa anti-reflectante (SiN_x) y aluminio mediante el grabado con fluoruro de hidrógeno (HF) en las células fotovoltaicas. Después se sumergen el emisor (*n-Emitter*) y el campo de la superficie trasera (*Back Surface Field*) en una solución de grabado de hidróxido de sodio (NaOH), para poder separarlos. Finalmente se obtiene el silicio de grado solar. Este tratamiento no es autolimitado, lo cual significa que debe ser monitorizado para maximizar la cantidad de

silicio de grado solar recuperado (Huang et al., 2017). Este proceso químico ha sido investigado por diversos autores (Weckend et al., 2016; Chen et al., 2019; Klugmann-Radziemska y Ostrowski, 2010), para intentar maximizar el proceso de recuperación y valoración de los diferentes elementos componentes de un módulo solar fotovoltaico. Si este tratamiento se repite de forma secuencial, es posible conseguir una recuperación elevada (aproximadamente el 90% de Si y metales peligrosos también el 90%). En la Figura 18 se muestran los pasos descritos de forma esquematizada:

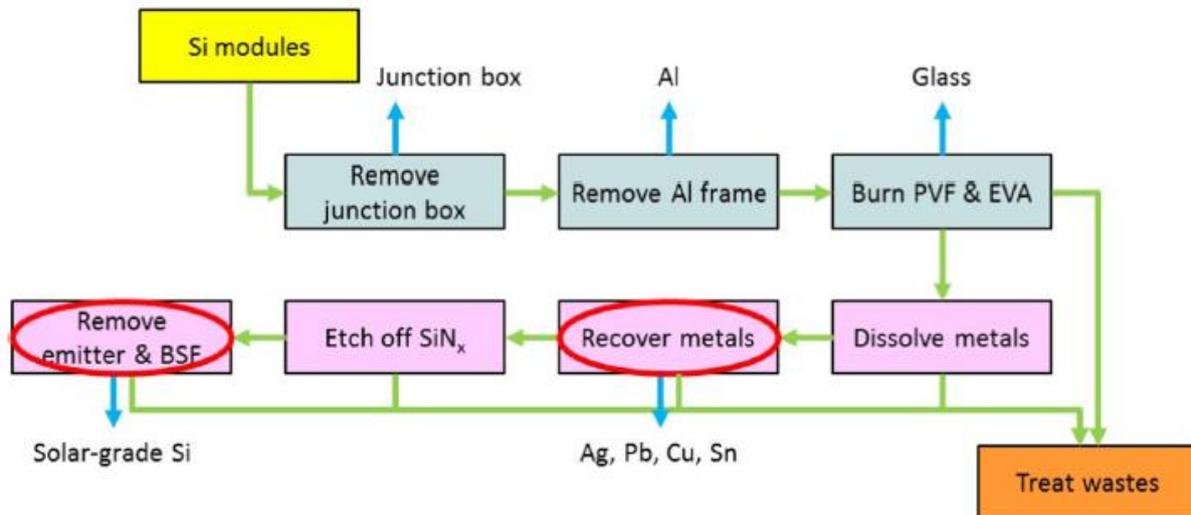


Figura 18. Esquema del proceso propuesto para recuperar Si y metales valiosos. Fuente: Huang et al., 2017.

Finalmente, la recuperación de metales de alto valor genera residuos químicos que es necesario gestionar. Se generan tres soluciones: NaOH, HNO₃ y HF. El NaOH y el HNO₃ pueden neutralizarse entre sí para formar nitrato de sodio (NaNO₃), el cual puede ser utilizado como fertilizante (U.S. Department of Agriculture, 2011). Por otra parte, el residuo de HF es tratado mediante la adición de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) para precipitar el flúor en forma de fluoruro de calcio (CaF₂) (Van den Broeck et al., 2003). Además, el agregado de trióxido mineral (MTA) mezclado con CaF₂ (sobrante en el anterior paso) adquiere propiedades antibacterianas mejoradas, teniendo especial eficacia en las bacterias *E. faecalis*, *P. endodontalis* y *P. gingivalis* (Lim y Yoo, 2021). También se deben contemplar los residuos gaseosos resultantes del proceso de reciclaje. Uno de ellos, se trata del escape del horno de combustión de polímeros que contiene flúor. El otro es el escape de la disolución del metal en HNO₃, que contiene NO y/o NO₂. Se requieren depuradoras para atrapar el flúor en el agua como HF y NO y NO₂ en el agua como HNO₃. Además, es posible utilizar los ácidos de las depuradoras en el proceso de reciclaje (Huang et al., 2017). De esta forma, este proceso se convierte en circular, abandonando la idea de la producción en cadena y teniendo en cuenta todas las entradas y salidas del sistema y, que estas se puedan retroalimentar.

De forma adicional, cabe destacar el trabajo del programa japonés NEDO (*New Energy and Industrial Technology Development Organization*) y de FAIS (*Foundation for Advancement of International Science*). De esta forma, el país nipón demuestra su iniciativa para mejorar, automatizar e implementar la tecnología de reciclaje por pasos. Esta se diferencia de los que se han descrito anteriormente en que la parte trasera,

compuesta por fluoruro de polivinilo (PVF), es retirada de forma previa a la pirolisis, como se muestra en el tercer paso de la Figura 19. Dicho proceso queda desarrollado en el estudio de Komoto (2014) y puede ser fundamental en la agilización del proceso de reciclado y valorización de módulos fotovoltaicos. El objetivo del proyecto es realizar este tratamiento en unas instalaciones con una capacidad de 200 MW/año (Komoto et al., 2018).

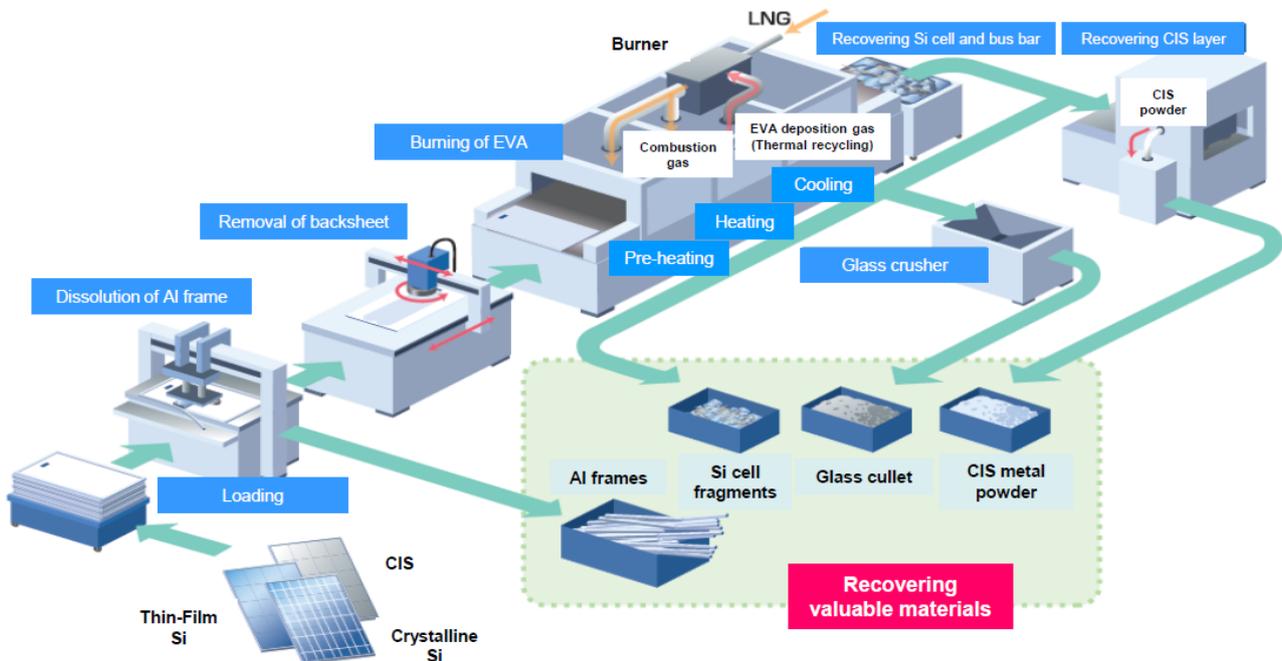


Figura 19. Proceso de automatización del reciclado de paneles fotovoltaicos. Fuente: Komoto (2014)

Este proceso es principalmente mecánico y térmico. Consta de varios pasos: la retirada inicial del marco de aluminio, el raspado de la hoja trasera, la pirólisis del EVA (precalentado a 400°C y combustión a 500°C) recuperando el calor de la combustión, la recuperación del cristal sin roturas y metales y, finalmente, mediante procesos de enfriado y calentamiento, recuperación de fragmentos de células de silicio y cristales de desecho.

En la actualidad, los pasos descritos tanto por Huang et al., (2017) como por Komoto (2014) se encuentran descentralizados debido a la imposibilidad de crear plantas de reciclaje totalmente especializadas. La mejor opción, por el momento, es crear redes de industrias de reciclaje interconectadas para optimizar tanto el transporte como los pasos de valorización de los materiales que componen los sistemas fotovoltaicos.

Alemania es pionera en el reciclaje de paneles fotovoltaicos. El Ministerio Alemán Federal de Económicas y Tecnología (BMW) financió en 2002 un sistema piloto ambientalmente sostenible para reprocessar células solares minimizando el uso de soluciones de grabado tóxicas. Dicho proyecto se basa en un tratamiento químico y termal, y el silicio recuperado se emplearía en sustituir el metal de silicio de grado metalúrgico primario (MG-Si) (Latunussa et al., 2016), el cual posee una pureza de aproximada-

mente el 98% (Fermín, 2018). El informe final subrayó la falta de cantidades suficientes de residuos fotovoltaicos como principal obstáculo para establecer una infraestructura de reciclaje fotovoltaico (Latunussa et al., 2016).

Deutsche Solar, por otra parte, ha desarrollado un sistema de reciclado a escala industrial: la planta de reciclaje se centra en la recuperación del sustrato de la oblea de los módulos de c-Si. El proceso comienza inicialmente con la quema del encapsulante EVA. Esto promoverá la oxidación química de los otros componentes que se encuentran dentro del módulo y, por lo tanto, se requiere una fase de grabado poco después para eliminar la metalización, el revestimiento antirreflectante y la unión pn. El sustrato limpio de tipo p es el producto final que puede integrarse nuevamente en la línea de producción de células solares estándar mientras que el resto de componentes pueden ser procesados para reintegrarse en la cadena productiva igualmente, bien en la industria fotovoltaica como en otro tipo de industrias (Latunussa et al., 2016).

El método de disolución en ácido nítrico ha demostrado ser el más efectivo para la recuperación de metales de alto valor, pero a su vez, también se trata del más nocivo para el medio ambiente debido al requerimiento de grandes cantidades de ácido para realizar el proceso (como se muestra en la Tabla 6). Además, producir dicho ácido conlleva la liberación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas al aire pudiendo afectar a la calidad del aire local si estos métodos se llevasen a cabo a escala industrial, por ejemplo, apareciendo smog fotoquímico. Mientras, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) (Ullmans, 1991), ozono y vapor de agua contribuirían a la acumulación de gases de efecto invernadero. Estas sustancias pueden tener un efecto negativo en la calidad del aire local. Por lo tanto, los valores de acidificación, calentamiento global, smog en el aire y materia particulada más altos y dañinos para la salud humana corresponden a los métodos que utilizan productos químicos elevados en comparación con los métodos que utilizan electricidad (Maani et al., 2020). Se deben comparar los métodos desarrollados por Klugmann-Radziemska y Ostrowski (2010), Huang et al., (2017), Komoto (2014) y Latunussa et al., (2016). Todos ellos coinciden en el uso de tratamiento con ácido nítrico para la recuperación de materiales y su posterior valorización. Además, Huang et al., (2017) propone ideas para crear un ciclo cerrado valorizando el residuo químico resultante del proceso de lixiviación de los metales, tanto líquidos como gaseosos. Por tanto, demuestra ser un proceso más ventajoso y beneficioso tanto para la economía como para el medio ambiente.

Según el análisis y la comparación de las investigaciones desarrolladas en esta sección, se deduce que la mejor opción para la valorización de los módulos fotovoltaicos de tipo c-Si, sería una cadena de reciclado donde se combinen diferentes enfoques para el tratamiento de los distintos componentes. Esto se debe a que cada método posee diferentes eficiencias de recuperación dependiendo del componente que se trate, como se muestra en la Figura 20.

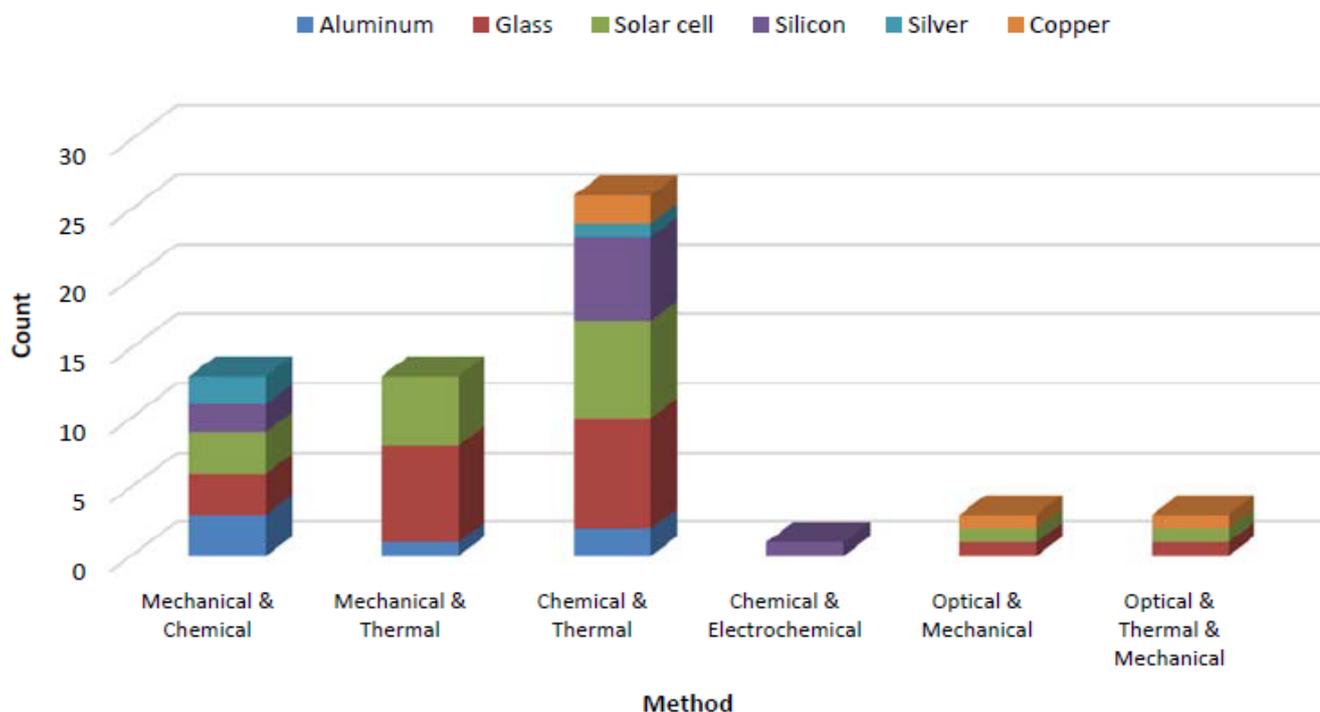


Figura 20. Materiales recuperados en el reciclaje de módulos fotovoltaicos de c-Si mediante combinaciones de procesos. Fuente: Komoto et al., 2018.

La Figura 20 es el resultado de una investigación de Komoto et al., (2018) donde realizan un estudio de las tendencias tecnológicas mediante la combinación de dos categorías de análisis: el componente de destino y el método de procesamiento, con los materiales utilizados y el método de procesamiento. Este estudio ha sido desarrollado mediante el análisis de las patentes solicitadas (representadas como *Count* en la Figura 20) por entidades dedicadas al reciclaje fotovoltaico. Dicho análisis permite conocer los métodos más comunes. Se aprecia que la combinación usada más frecuentemente es la químico-térmica, seguida de la mecánico-térmica y la mecánico-química.

Se observa que el tratamiento químico es común en los procesos con un rendimiento óptimo. Este método es necesario en una de las fases del proceso debido a que, de otro modo, no sería rentable. Ahora bien, la evolución de esta metodología se debe centrar en reducir dichas cantidades de compuestos químicos o buscar sustitutos menos nocivos para el medio ambiente. Como se muestra en la Figura 20, para obtener los mejores resultados se deberían aplicar a las plantas de reciclaje de módulos fotovoltaicos las técnicas mecánica, térmica y química, combinadas. Pensando a escala industrial, cuando el volumen de módulos fotovoltaicos que hayan llegado al final de su vida útil sea muy elevado, sería imperativo haber desarrollado métodos de reciclaje que produzcan el menor impacto ambiental posible. No sería sensato desarrollar nuevas técnicas de reciclado de módulos fotovoltaicos a costa de la generación de un nuevo impacto durante el proceso de reciclado o de fabricación de un producto.

3.3 Valorización de residuos fotovoltaicos en España

España es uno de los países de la UE con más plantas de tratamiento de RAEE pero aun así, no son instalaciones especializadas en módulos fotovoltaicos. A pesar de esto, existe un pliego de requisitos técnicos a cumplir por instalaciones de tratamiento de RAEE (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016) donde se especifican las fases de tratamiento para los paneles fotovoltaicos de silicio y qué aparatos deben someterse a este proceso: “se someterán a la operación de tratamiento G6 todos los aparatos incluidos en la subcategoría 4.2 del anexo I y categoría 7.1 del anexo III del Real Decreto 110/2015 que sean paneles fotovoltaicos cuyo componente principal sea el silicio (Si) según la Tabla1 del anexo VIII de dicho real decreto”. Este proceso consta de tres fases:

- Fase 0: recepción de los aparatos y desmontaje previo. Se introducen en la instalación y se almacenan de forma previa al desmontaje. Después se clasifican los RAEE y se seleccionan los paneles fotovoltaicos con silicio del resto de residuos. Finalmente se retiran las partes más accesibles de los módulos, como el vidrio protector, la carcasa exterior, el cableado y las cajas de conexiones. Todo esto facilita la preparación para el reutilizado y reciclado de los componentes y materiales.
- Fase 1: tratamiento. Una vez retiradas las partes más accesibles de los módulos fotovoltaicos en la Fase 0, se eliminarán los revestimientos plásticos como el EVA (Figura 21) y otros tipos de láminas plásticas que se usan como aislamiento de las celdas fotovoltaicas mediante tratamiento térmico o técnica equivalente. El tratamiento térmico o técnica equivalente utilizada (si aplica) deberá contar con un sistema de extracción de gases durante el proceso de combustión dotado con las medidas de seguridad adecuadas.



Figura 21. Retirada de polímeros plásticos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016.

- Fase 2: separación del resto de fracciones. En esta fase se retirarán las obleas de silicio del resto de fracciones valorizables. Todos los componentes retirados y las fracciones valorizables obtenidos en cada una de las fases de tratamiento se depositarán en contenedores separados para ser enviados a gestores autorizados para el tratamiento específico de cada uno de ellos.

De esto se puede deducir que es necesaria una mayor especificidad para mejorar el porcentaje de valorización de los módulos fotovoltaicos. Queda establecido un marco de actuación, pero esto no será suficiente si España se quiere convertir en una potencia en el reciclaje de residuos fotovoltaicos, actuando a la vanguardia en la transición a una Economía Circular. A partir de la revisión de investigaciones españolas enfocadas en la valorización, se extrae la primera conclusión de que se encuentran centradas sobre todo en el desarrollo de la eficiencia, utilización de nuevos materiales y la reducción de los mismos. En cambio, el estudio sobre el reciclado de los distintos componentes y sus elementos, y su uso posterior en el mismo campo de generación de energía o en otros diferentes, es un área menos explorada pero igualmente necesaria. Esto se debe a que el elevado tiempo de vida útil de los módulos fotovoltaicos provoca que la investigación sobre los distintos métodos de reciclado haya sido postergada.

Como promulga la el Real Decreto 110/2015: *“Para los RAEE incluidos en las categorías 1, 4 o 7: Se valorizará un 85% y se preparará para la reutilización y se reciclará un 80%”*.

3.3.1 Reducción o sustitución

La investigación en el campo de nuevos materiales es fundamental para optimizar las etapas de reducción y/o sustitución. Pero, para el uso de materiales novedosos es muy importante la optimización y desarrollo de nuevos métodos que supongan un ahorro, tanto en el proceso de producción como en el de desensamblaje. Uno de los métodos desarrollados para el análisis de nuevos materiales y sus propiedades fotovoltaicas, consiste en situar el sólido a estudiar dentro del reactor fotocatalítico. Dicho sólido puede ser cualquiera de los de tipo semiconductor, o semiconductor mejorado para potenciar su absorción de luz o su capacidad de transferir electrones y huecos en su superficie. De forma que este, se pone en contacto con el fluido escogido (solución acuosa basada en un disolvente orgánico como el etanol o la acetona, o un gas como aire o un gas inerte que contenga otro gas o un vapor capaz de ser oxidado o descompuesto por la reacción fotocatalítica), se irradia con luz y se analiza químicamente el fluido mediante los medios de análisis químico o espectroscópico (Conesa et al., 2013). La gran ventaja que ofrece este método es que permite realizar el estudio sin necesidad de construir contactos eléctricos sobre el material. Además, no requiere de una superficie lisa y compacta, permitiendo así utilizarlo sobre materiales pulverulentos o porosos. Esto puede suponer no sólo el descubrimiento de un nuevo material igual o más eficiente que los actuales, sino que también resulta en una reducción del peso de los módulos.

Por otro lado, el Contacto Trasero Integrado o *Integrated Back Contact* (IBC) se trata de una nueva estructura de célula solar que consiste en un proceso de fabricación a baja temperatura. Tanto el emisor como los contactos de la base se pueden obtener

en un solo paso de procesamiento láser. Las pilas de óxido de aluminio (Al_2O_3) y de carburo de silicio amorfo (a-SiC_x) depositadas a baja temperatura son los precursores de los átomos de dopaje de aluminio y fósforo, respectivamente. En este caso se cambian los materiales usados para el dopaje, con el objetivo de optimizar la conductividad. El proceso de fabricación es más simple que el “tradicional”, ya que el paso fotolitográfico para delimitar las regiones emisor y base podría ser eliminado. Los dispositivos preliminares alcanzaron una prometedora eficiencia del 15,5% (López et al., 2016). La fabricación de la hoja trasera a baja temperatura supone un ahorro de energía y una reducción en el tiempo de producción de los módulos fotovoltaicos.

Ambas investigaciones mejoran las opciones de valorización de los residuos fotovoltaicos debido a que pueden resultar en la fabricación de paneles solares más fáciles de reutilizar o reciclar, además de posibilitar la reducción de costes en todas las etapas del ciclo de producción.

3.3.2 Reutilización

Como ya se ha mencionado anteriormente, la reutilización de módulos solares es arriesgado debido a la reducción del rendimiento (*downcycling*). Por tanto, reutilizar los paneles solares de forma íntegra puede ser solamente beneficioso en caso de paneles destinados al autoconsumo (González et al., 2020). A continuación, se describe el proceso de selección de paneles fotovoltaicos usados:

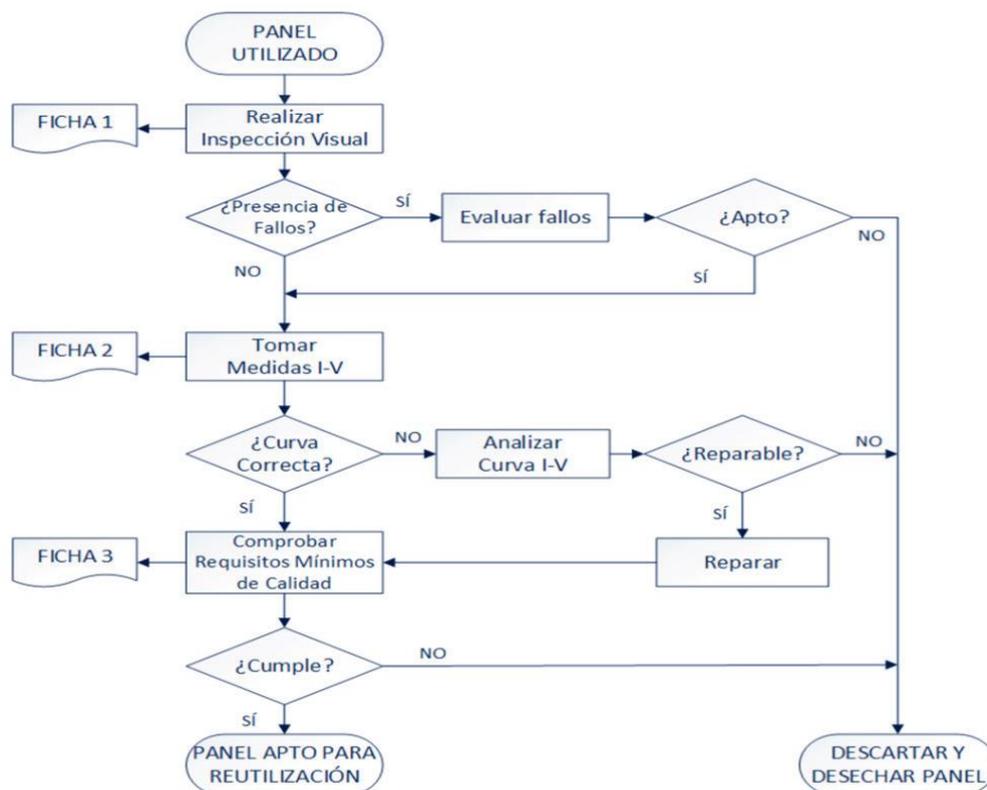


Figura 22. Esquema de selección de un panel fotovoltaico usado. Fuente: (González et al., 2020)

Este procedimiento surge con el objetivo de desarrollar un procedimiento sencillo, económico y sostenible que sirva para evaluar la posibilidad de reutilización de paneles fotovoltaicos desechados. Se divide en 2 etapas principales:

- 1) La inspección visual: realizada por un técnico cualificado en un tiempo de entre 5 y 10 minutos, siguiendo la normativa especificada en UNE-EN 61215 (MQT 01).
- 2) El análisis de la curva I-V (intensidad-voltaje): se observa determinando los valores de corriente de cortocircuito, tensión en circuito abierto, tensión y voltaje a potencia máxima y potencia máxima. Estos requisitos aparecen en la normativa UNE-EN 61215 (MQT 02), y el técnico tendrá 20 minutos para revisarlo.

Por último, los requisitos mínimos de calidad exigibles para la reutilización de un panel son: que no cause inseguridad sobre el sistema o los usuarios, que no sufra pérdida de potencia saturada y que el rendimiento no sea menor al 90% (eficiencia media estimada tras 15 años de uso). Una vez recorridos los pasos necesarios, si se cumplen los niveles de calidad, el panel podrá ser reutilizado. Si no los cumple, es necesario evaluar si es reparable. En caso de no serlo, el módulo será desechado (González et al., 2020).

Cada uno de los pasos se gestiona mediante el uso de fichas electrónicas (Figura 22), favoreciendo así, la agilización del proceso. Además, este es un proceso beneficioso tanto a nivel ambiental como socio-económico. La rentabilidad, entendida como la relación entre la inversión y los beneficios, es superior al 7,09% exigido para este tipo de instalaciones (UNEF, 2019).

3.3.3 Reciclado o valorización

Con el fin de valorizar elementos que no han podido ser reutilizados, o que simplemente tienen la posibilidad de ser utilizados con una finalidad diferente a la generación de energía, la Universidad Politécnica de Cataluña analizó la viabilidad de usar células solares de silicio como aditivo en la producción de cemento (Fernández et al., 2011).

Este tratamiento se realiza mediante la hidratación de una mezcla de cemento de aluminato cálcico (CAC) y residuos de una célula fotovoltaica cristalina. La investigación demuestra que el aluminio resultante de la adición de residuos de células solares (SCR) produce una reacción en etapas tempranas con los componentes hidratados, produciendo hidrógeno. Dicho gas genera la aparición de una estructura densa y muy porosa (Figura 23), lo cual afecta directamente a la resistencia del material.

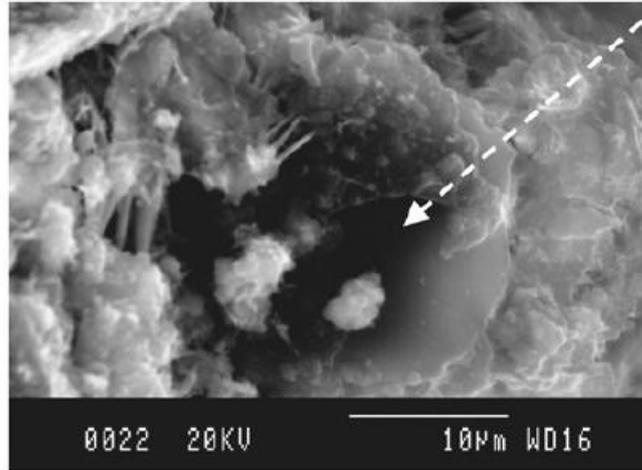


Figura 16. Microestructura de una muestra con un 5% de SCR. Fuente: Fernández et al., (2011).

Esto no quiere decir que el material resultante no tenga ningún tipo de uso, ya que tiene una composición porosa adecuada para una función no estructural muy interesante, como es el aislamiento acústico tal y como se recoge en la Tabla 8.

SCR (%)	Porosidad total (%)	Densidad (kg/m)	Absorción (%)
0	12,7	2,2	5,7
0,3	13,3	2,1	6,2
1	14,2	2,1	6,8
3	14,4	2,0	7,0
5	14,5	2,0	7,2

Tabla 8. Porosidad total, densidad y absorción en función del incremento de SCR. Fuente: Fernández et al., (2011).

La Tabla 8 muestra que, con el incremento de los residuos de células solares a la mezcla, se produce un incremento de la porosidad y la absorción, y un descenso de la densidad.

Las investigaciones en España sobre esta materia son reducidas, pero esto no quiere decir que la gestión de los residuos generados por el país sea deficiente, ya que es uno de los países de la Unión Europea con mejor gestión de los mismos. Se debe llevar a cabo una correcta gestión, tratamiento y reciclado de los módulos fotovoltaicos y, en España está cada vez más extendido el uso de Sistemas de Gestión Integrados (SGI) ya que facilitan la gestión de diferentes disciplinas y se ajustan a normas dictadas a nivel internacional: ISO (*International Organization for Standardization*). A nivel nacional se encuentra AENOR (Agencia Estatal de Normalización), la cual se encarga de crear la norma y controlarla mediante la realización periódica de auditorías a empresas que se acojan a dicha norma. En España se requiere a las empresas recuperadoras y recicladoras la certificación en ISO 14001 (normas medioambientales) e ISO 9001 (normas de seguridad) para que éstas sean auditadas por técnicos expertos que

realicen mediciones y correcciones en función del cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma.

Actualmente el flujo de residuos fotovoltaicos, es muy bajo. Por tanto, se recurre al uso de centros de almacenamiento temporal, que consisten en el almacenamiento de este tipo de residuo (RAEE) hasta que alcance un volumen suficiente que haga viable económicamente su tratamiento. Además, al ser de fabricación antigua, los paneles fotovoltaicos no están diseñados para una separación de sus componentes sencillas (ecodiseño), por tanto, su reciclado es dificultoso.

En cuanto a las organizaciones que se dedican a este tipo de valorización, es importante nombrar a Recyclia como una de las entidades gestoras de RAEE en España, de hecho, en 2013 la Fundación PV CYCLE España subcontrató los servicios de dicha entidad. Cuenta con la agrupación de diferentes fundaciones medioambientales como Ecoasimelec, la cual es la encargada de gestionar e informar sobre los aparatos eléctricos y electrónicos a cuyas empresas estén adheridas a la plataforma.

Esto supone un importante punto de partida para dar soporte e informar al mercado fotovoltaico español y sus miembros.

Según la citada plataforma, los RAEE son almacenados de forma conjunta, sin contar con una recogida y clasificación previa especializada. Lo que significa que en España, hasta la fecha, no se almacenan de forma correcta los paneles fotovoltaicos que han llegado al fin de su vida útil.

3.4 Análisis del impacto económico y ambiental del reciclaje y valorización del material procedente del desmantelamiento de plantas fotovoltaicas

El reciclaje y valorización de los componentes de paneles fotovoltaicos está destinado en gran parte a la reutilización de los mismos en el ciclo productivo fotovoltaico, para así, poder reducir la cantidad de materias primas extraídas de la Tierra para la fabricación de los sistemas fotovoltaicos. Esto no quiere decir que ciertos elementos no puedan ser usados con otras finalidades más allá de la generación de energía. Esto ocurre porque no todos los materiales recuperados cumplen los requisitos necesarios para formar parte de un nuevo panel.

Es fundamental analizar los residuos que se van a producir para poder establecer correctamente los objetivos de recuperación y valorización de los paneles que han llegado al fin de su vida útil:

Overview of global PV panel waste projections, 2016-2050

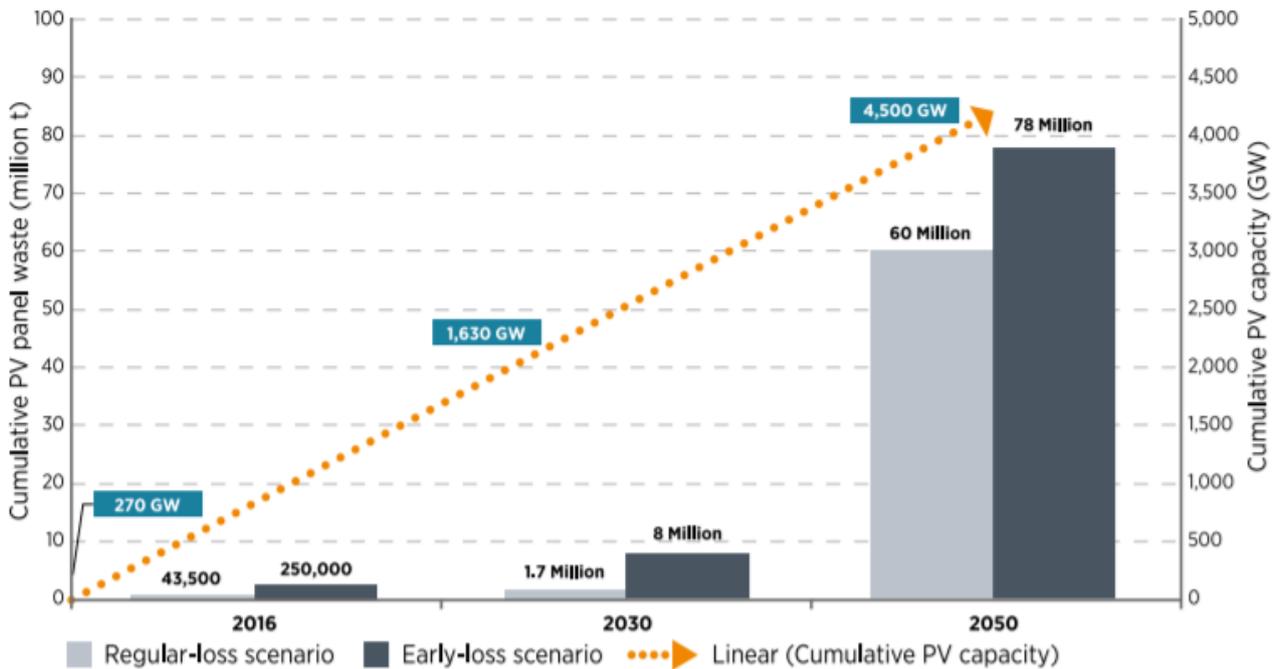


Figura 24. Proyecciones de generación de residuos fotovoltaicos (2016-2050). Fuente: Weckend et al., 2016.

Como se muestra en la Figura 24, la cantidad de residuos de origen fotovoltaico que se van a generar va a ser inmensa en las próximas tres décadas. Esto significa que la recuperación de materias primas secundarias puede significar una importante creación de valor a nivel mundial, llegando a recuperarse el equivalente a 60 millones de nuevos paneles en 2030. De esta forma, la valorización de los residuos de origen fotovoltaico puede influir significativamente a la capacidad fotovoltaica acumulada creada a partir de materias primas recuperadas y, por tanto, no extraída del medio.

Teniendo en cuenta que, como menciona Lunardi et al., (2018), PV Cycle alcanzó en 2016 con su proceso de reciclado un récord de eficiencia del 96% para módulos fotovoltaicos del tipo c-Si, es posible recuperar grandes cantidades de materia prima como se puede observar en la Tabla 9:

Componentes	Peso por panel (Kg)	Materia prima recuperada 2030 (Tn)	Materia prima recuperada 2050 (Tn)
Vidrio (<1% de antimonio)	15,4	924.000	30.800.000.000
Aluminio	4,07	244.200	8.140.000.000
EVA (polímero encapsulante)	1,12	67.200	2.240.000.000
Célula solar de silicio	0,8	48.000	1.600.000.000
Hoja posterior (fluoruro de polivinilo)	0,33	19.800	660.000.000
Cobre	0,24	14.400	480.000.000
Plata	0,01	600	20.000.000
Otros metales (estaño, plomo)	0,01	600	20.000.000

Tabla 9. Estimación de materias primas recuperadas mediante reciclado. Fuente: cálculo propio a partir de las previsiones de IRENA (Weckend et al., 2016).

Como se puede apreciar en la Tabla 9, las estimaciones de materiales recuperados son prometedoras y la repercusión tanto económica, como ambiental e incluso social puede ser de gran magnitud, por tanto, y es fundamental la inversión en plantas específicas para el tratamiento de dichos residuos fotovoltaicos y la colaboración internacional para alcanzar los objetivos propuestos. Todo esto supone un revulsivo para la creación de nuevas empresas que quieran dedicarse a la gestión de este tipo de RAEE, o simplemente para antiguas empresas que quieran actualizar objetivos y sus instalaciones.

Además, la repercusión que el reciclaje de los paneles fotovoltaicos supone al medio ambiente es enorme. La gestión de los módulos fotovoltaicos evita que estos acaben siendo apilados en vertederos expuestos a los agentes externos (malas condiciones climáticas) y, por consiguiente, los elementos de los que están compuestos quedarán más tarde o más temprano en contacto con el medio ambiente debido a lixiviaciones que se produzcan en el suelo. Estos elementos se encuentran en una proporción muy reducida en relación a la masa de cada panel, pero una mala gestión de estos residuos sumada a un gran volumen puede derivar en la contaminación de suelos cercanos y la posible filtración de estos a cuerpos de aguas subterráneos. Por ello, se debe tener en cuenta que el correcto transporte y almacenamiento de los módulos es clave para evitar procesos de lixiviado. En concreto, el plomo (Pb) se encuentra en estado sólido y, debido a la exposición de los paneles de primera generación (c-Si) a elementos como el ácido nítrico o la lluvia, su proceso de lixiviación puede aumentar desde un 13% a un 90% (Escuela, 2017). Esto puede provocar:

- Pérdida de biodiversidad
- Disminución del crecimiento
- Disminución de la tasa de reproducción de animales y plantas
- Efectos neurológicos en vertebrados

Además, una solución para evitar la sobre escalada de la industria del reciclaje de residuos fotovoltaicos en España en épocas en las que la generación de dichos residuos fluctúe, es el almacenaje (Escudero, 2020). Esto significa que no es tan necesario construir un gran número de instalaciones dedicadas al tratamiento específico de módulos fotovoltaicos. Sino que se le debe dar mucha importancia a las redes y métodos de almacenaje, lo cual agilizaría la gestión y, por ende, el tratamiento de los mismos. Igualmente, este método permite que cuando la generación de residuos disminuya, no haya centros de reciclaje parados o con baja actividad. Todo esto quiere decir que la optimización del almacenamiento de residuos es fundamental para la viabilidad económica de este tipo de reciclaje.

Por otra parte, como se dijo con anterioridad, un panel pesa de media 22 kg y cada uno contiene unos 13 g de Pb. Esto significa que por cada tonelada de residuos fotovoltaicos de tipo c-Si, se encontrarán entre 75 g y 518 g de Pb, dependiendo de sus dimensiones. Se ha estimado por parte de algunos autores que el coste de restauración del ecosistema debido a la afectación por plomo está en torno a 1.17 €/g de Pb liberado (Escuela, 2017). El gran problema surge cuando no se produce un correcto transporte y almacenado y los módulos se ven dañados durante el proceso, por tanto, si se piensa en una inversión y un desarrollo gradual de esta industria, estos dos aspectos serían a los que habría que darles prioridad.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Este trabajo de fin de máster se centra principalmente en estudiar la posibilidad de aplicar el modelo de Economía Circular a la industria de la energía fotovoltaica. Tras el análisis de los distintos métodos de valorización de los módulos fotovoltaicos de c-Si, es posible afirmar que las nuevas investigaciones y el desarrollo de nuevas tecnologías fotovoltaicas a nivel mundial van a permitir la inserción de esta industria en un sistema circular. Se observa en España una clara transición hacia políticas más sostenibles, fomentadas por los objetivos marcados por la Unión Europea y el resto de potencias mundiales en este ámbito. Pero, no obstante, es importante seguir actualizando la legislación, ya que para algunas empresas sigue siendo más beneficioso pagar posibles multas por parte del Estado o la Unión Europea, por eso es necesario incrementar las sanciones y la vigilancia para así, de forma indirecta, fomentar la valorización de los residuos fotovoltaicos.

Es fundamental entender que la valorización no debe influir únicamente al último paso del ciclo productivo, sino que debe afectar a todas las etapas por igual, ya que, en la producción de paneles fotovoltaicos, como se ha demostrado, el ecodiseño y la reducción de determinados elementos potencialmente peligrosos, o simplemente nocivos en grandes cantidades, es la clave para una fácil y eficaz reutilización o recuperación de los componentes.

En cuanto a la eficiencia en la recuperación de componentes y sus posibles utilidades a posteriori, se ha demostrado que la combinación de los métodos mecánico, químico y térmico sería la solución ideal para maximizar la eficiencia del proceso de reciclado. Y que, los componentes recuperados pueden ser bien reintroducidos en el ciclo productivo o bien, utilizados para formar parte de otro producto. Para poder construir plantas de reciclaje tan especializadas es imprescindible un alto volumen de residuos fotovoltaicos y, por otra parte, concienciar a los inversores creando esquemas de financiación novedosos, generando un apoyo de todas las partes interesadas.

Además, diferentes países del mundo que están apostando por la energía solar fotovoltaica también están colaborando en diferentes proyectos, unificando recursos y conocimientos, lo cual augura un avance rápido y un incremento de las posibilidades de valorización de residuos fotovoltaicos. Aun así, las posibilidades actuales permiten el tratamiento de los residuos con una alta eficiencia, por tanto, sólo cabe poco a poco transformar el sistema de reciclado descentralizado actual, en plantas de tratamiento especializado donde se centralice la actividad de reciclado y se produzca, de esta forma, un incremento en la eficiencia de recuperación de todos los materiales presentes en los paneles fotovoltaicos. Todo esto es posible mediante la creación de redes de transporte, tanto continentales como mundiales, permitiendo ofrecer soporte entre diferentes países, porque como se ha desarrollado en este trabajo, el volumen de estos residuos va a aumentar notablemente a partir de los próximos 10 años y, dicho incremento puede resultar crítico si los países no están preparados. Lo cual significa que la correcta gestión y almacenamiento serán pilares fundamentales, debido a que se estima que la generación de dichos residuos será superar a nuestra capacidad para procesarlos.

Por tanto, y como conclusión final, la colaboración será la llave que nos permita cambiar los modelos de consumo y producción insostenibles, e introducirnos gradualmente en un nuevo mundo basado en la Economía Circular donde la palabra “basura” pase a formar parte de los libros de historia. La valorización será la fundamental para arreglar los problemas generados por antiguos modelos económicos poco o nada sostenibles.

REFERENCIAS

Adothu, B., Bhatt, P., Chattopadhyay, S., Zele, S., Oderkerk, J., Sagar, H. P., ... & Mallick, S. (2019). Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant—A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation. *Solar Energy*, 194, 581-588.

Alonso, Jose (2019). Cambio Energético. *El reciclaje de las placas solares*. Recuperado de [https://www.cambioenergetico.com/blog/reciclaje-placas-solares/#:~:text=%C2%BFPueden%20reciclarse%20los%20paneles%20solares,9%25\)%2D%20son%20f%C3%A1cilmente%20reutilizables](https://www.cambioenergetico.com/blog/reciclaje-placas-solares/#:~:text=%C2%BFPueden%20reciclarse%20los%20paneles%20solares,9%25)%2D%20son%20f%C3%A1cilmente%20reutilizables).

Berry, C. (2014). Case Study of a Growth Driver—Silver Use in Solar.

Boulding, K. (1966). E., 1966, the economics of the coming spaceship earth. *New York*.

Celda-Solar (2017). Dexen Energy. Recuperado de <https://www.dexen.mx/celdas-solares/attachment/celda-solar/>

Chen, W. S., Chen, Y. J., & Chen, Y. A. (2019, June). The application of organic solvents and thermal process for eliminating EVA resin layer from waste photovoltaic modules. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 291, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

Choi, J. K., & Fthenakis, V. (2010). Design and optimization of photovoltaics recycling infrastructure. *Environmental science&technology*, 44(22), 8678-8683.

Conesa Cegarra, J. C., Lucena García, R., Fresno García, F., Wahnón Benarroch, P., & Palacios Clemente, P. (2013). Método para determinar las propiedades fotovoltaicas de materiales sólidos susceptibles de actuar como absorbentes de luz en dispositivos fotovoltaicos.

CU-PV (2016), CU-PV - *Sustainable PV - Cradle-to-Cradle Sustainable PV Modules*, Energy Research Centre of the Netherlands and PV CYCLE. Recuperado de www.sustainablepv.eu/cu-pv/

D'Adamo, Idiano, Michela Miliacca, and Paolo Rosa. "Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules." *International Journal of Photoenergy* 2017 (2017).

de Paulo, A.F., Ribeiro, E.M.S. & Porto, G.S. (2018) Mapping countries cooperation networks in photovoltaic technology development based on patent analysis. *Scientometrics* 117, 667–686. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2892-6>

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550.

- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., & Veit, H. (2017). Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 60, 716-722.
- Ding, N., Gao, F., Wang, Z. H., & Gong, X. Z. (2012). Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission. *The Chinese Journal of Non ferrous Metals*, 22(10), 2908-2915.
- Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar energy materials and solar cells*, 67(1-4), 397-403.
- Doni, A., Dughiero, F. (2012). Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, pp. 000757–000762. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317715>.
- ECOLEC (2018). *Guía de declaración de los aparatos puestos en el mercado ante el Registro Integrado Industrial*. Recuperado de https://www.ecolec.es/wp-content/uploads/2018/08/Gu%C3%ADa_ECOLEC_Declaraciones_AEE_RII-RAEE_20180725.pdf
- Escudero, M. R. (2020) Una mirada al futuro del reciclaje de paneles fotovoltaicos en España.
- Escuela Moreno, C. (2017). Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos.
- Espejo-Marín, C., & Aparicio-Guerrero, A. E. (2020). La Producción de Electricidad con Energía Solar Fotovoltaica en España en el Siglo XXI. *Revista de Estudios Andaluces*, (39), 66-93.
- Europe, S. P. (2020). Global Market Outlook For Solar Power 2020-2024. *Solar Power Europe, Brussels, Belgium, Tech. Rep.*
- Eurostat (2020). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations*. Recuperado de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASELEE_custom_242370/settings_1/table?lang=en
- Farrell, C., Osman, A. I., Zhang, X., Murphy, A., Doherty, R., Morgan, K., ... & Shen, D. (2019). Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules. *Scientificreports*, 9(1), 1-13.
- Fermín, J. R. (2018). De la arena a la oblea de silicio. *Revista Tecnocientífica URU*, (14), 55-62.
- Fernández, L. J., Ferrer, R., Aponte, D. F., & Fernandez, P. (2011). Recycling silicon solar cell waste in cement-based systems. *Solar energy materials and solar cells*, 95(7), 1701-1706.
- Frisson, L., Lieten, K., Declercq, K., Szlufcik, J., de Moor, H., Goris, M., Benali, a., Aceves, O., (2000). Recent improvements in industrial PV module recycling. 16th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf, pp. 1–4.

Gas Natural Fenosa Renovables, S.L.U. (2017). Estudio de Impacto Ambiental: *Planta Solar Fotovoltaica Las Jaras de Badajoz*. Recuperado de <http://industriaextremadura.juntaex.es/kamino/attachments/article/13984/1.%20EsIA%20PSFV%20LasJaras%20de%20Badajoz.pdf>

Gas Natural Fenosa Renovables, S.L.U. (2017). Estudio de Gestión de Residuos: *Planta Solar Fotovoltaica Las Jaras de Badajoz*. Recuperado de <http://industriaextremadura.juntaex.es/kamino/attachments/article/13984/Anexo%20%20Estudio%20de%20Gesti%20%20de%20residuos%20Las%20Jaras.pdf>

García-García, E., Moubarak Meziani, Y., Enrique Velázquez-Pérez, J., Calvo-Gallego, J. (2012). Solar energy: silicon solar cells. Recuperado de <https://www.scienceinschool.org/es/article/2012/solar-es/>

González Cano, M., Moretón, A., Rebollo, G., Martínez, O., & Jiménez, J. (2020). Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas. In *CIES2020-XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Ibero-americano de Energía Solar* (pp. 497-502). LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. J. S. E. M. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar energy materials and solar cells*, 123, 239-248.

Green, M. A. (2002). Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 65-70.

Gudín Rodríguez-Magariños, F. (2019). Economía circular en la Unión Europea: un marco jurídico global para el Derecho medioambiental del siglo XXI. *Editorial Las Rozas, España*.

Hao, H., Lin, K. L., Wang, D., Chao, S. J., Shiu, H. S., Cheng, T. W., & Hwang, C. L. (2013). Utilization of solar panel waste glass for metakaolinite-based geopolymer synthesis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(3), 797-803.

Huang, W. H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W. C., & Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy*, 144, 22-31.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (2011). *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. Recuperado de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>

International Organization for Standardization. (2006). *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework* (No. 2006). ISO.

Kim, M. R., Goldsmidt, V., Pampena, R., Marcos, K., & Martínez, A. M. (2000). Optimización del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4.

Kim, Y., Lee, J., 2012. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 98,317–322. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.022>.

Klugmann-Radziemska, E., y Ostrowski, P. (2010). Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 35(8), 1751-1759.

Komoto, K. (2014). Developments on PV recycling in japan. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg*.

Komoto, K., Lee, J. S., Zhang, J., Ravikumar, D., Sinha, P., Wade, A., & Heath, G. A. (2018). End-of-lifemanagement of photovoltaic panels: trends in PV module recycling-technologies (No. NREL/TP-6A20-73847). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Kusch, S., & Alsheyab, M. A. (2017). Waste electrical and electronic equipment (WEEE): a closer look at photovoltaic panels. *Proceedings of the 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM*, 29, 317-324.

Las células solares fotovoltaicas (2019). Es energía. Recuperado de <https://esenergia.es/celulas-solares-tercera-generacion/>

Latunussa, C. E., 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.

Latunussa, C., Mancini, L., Blengini, G., Ardente, F., & Pennington, D. (2016). Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. *Publications Office of the European Union: Luxembourg*.

Lim, M., & Yoo, S. (2021). The antibacterial activity of mineral trioxide aggregate containing calcium fluoride. *Journal of Dental Sciences*.

Lin, K. L., Lee, T. C., & Hwang, C. L. (2015). Effects of sintering temperature on the characteristics of solar panel waste glass in the production of ceramic tiles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 194-200.

López, G., Ortega, P. R., Martín, I., Voz, C., Orpella, A., & Alcubilla, R. (2016). "Cold" process for IBC c-Si solar cells fabrication. *Energy Procedia*, 92, 652-660.

Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., & Corkish, R. (2018). A review of recycling processes for photovoltaic modules. *Solar Panels and Photovoltaic Materials*.

Maani, T., Celik, I., Heben, M. J., Ellingson, R. J., & Apul, D. (2020). Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of The Total Environment*, 735, 138827.

MacArthur, F. E. (2014). Hacia una economía circular: Resumen ejecutivo.

Mansour, D. E., Barretta, C., Pitta Bauermann, L., Oreski, G., Schueler, A., Philipp, D., & Gebhardt, P. (2020). Effect of Backsheet Properties on PV Encapsulant Degradation during Combined Accelerated Aging Tests. *Sustainability*, 12(12), 5208.

MBDC LLC, 2012. MBDC Cradle to Cradle Design [WWW Document]. Cradle to Cradle Certif. Prod. Stand. e Version 3.0. <https://mbdc.com/how-to-get-your-product-cradle-to-cradle-certified/>

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). Remaking the way we make things: Cradle to cradle. *New York: North Point Press. ISBN, 1224942886*, 104.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Requisitos técnicos instalaciones de tratamiento de RAEE*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/rqtecnicosinsttratamientoraee-v2_tcm30-185564.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020). *España Circular 2030: Estrategia Española de Economía Circular*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia/>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021). *Resolución de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental por la que se publican los Objetivos Mínimos Estatales Y Autonómicos de recogida separada de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) para el año 2021*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/rqtecnicosinsttratamientoraee-v2_tcm30-185564.pdf

Nain, P., & Kumar, A. (2020). Initial metal contents and leaching rate constants of metals leached from end-of-life solar photovoltaic waste: an integrative literature review and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109592.

Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 99-112.

Parlamento Europeo, C. (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE).

Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. JHU press.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – PNUMA (2015). *Descubriendo los caminos hacia una economía verde e inclusiva. Resumen Ejecutivo*. Recuperado de <https://www.un.org/ruleoflaw/es/un-and-the-rule-of-law/united-nations-environment-programme/>

Puentes Cociña, B. (2018). Gestión y prevención de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE): una propuesta para promover la economía circular.

PV Resources. Recuperado de <http://www.pvresources.com/en/links/links.php>

Red Eléctrica de España (REE): <https://www.esios.ree.es/es>

Ríos, J. J. A., Ahnert, V. A., Gil, J. B., & Díaz, E. M. (2017). La regulación del autoconsumo en España: ¿un impuesto al Sol?. *Revista de Obras Públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, (3584), 40-47.

Rodríguez, I. (2012). La “nave espacial tierra” de Kenneth Boulding. *Revista de economía crítica*, 14, 320-326.

Rollet, C., & Beetz, B. (2020). Reciclaje de paneles fotovoltaicos: ¿por qué no se consigue al 100%? *PV Magazine*. Recuperado de <https://www.pv-magazine.es/2020/08/24/reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-por-que-no-se-consigue-al-100/>

Sánchez Molina, P. (2020). Andalucía, la región donde más se ahorra con el autoconsumo residencial. *PV Magazine*. Recuperado de <https://www.pv-magazine.es/2020/10/07/andalucia-la-region-donde-mas-se-ahorra-con-el-autoconsumo-residencial/#:~:text=Actualmente%2C%20el%20territorio%20andaluz%20cuenta,de%20C%C3%A1diz%2C%20Granada%20y%20Ja%C3%A9n.>

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

Sherwani, A. F., & Usmani, J. A. (2010). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 540-544.

Sol Energy (2020). Que es un panel solar. Recuperado de <https://www.solenergy.mx/es/principal/informacion#:~:text=Un%20panel%20promedio%20hoy%20en,su%20eficiencia%20en%20%C3%A1rea%20aprovechada.>

Solar Waste. *PV & Waste Regulations*. Recuperado de <http://www.solarwaste.eu/pv-waste-legislation/>

Strevel, N., Trippel, L., Kotarba, C., & Khan, I. (2013). Improvements in CdTe module reliability and long-term degradation through advances in construction and device innovation. *Photovoltaics International*, 22, 66-74.

Study on Photovoltaic Panels Supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive

Sumper, A., Robledo-García, M., Villafáfila-Robles, R., Bergas-Jané, J., & Andrés-Peiró, J. (2011). Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8), 3888-3896.

Tamaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., & Manzo, S. (2016). Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *Journal of hazardous materials*, 306, 395-405.

U.S. Department of Agriculture, 2011. Supplemental Technical Report for Sodium Nitrate (Crops).

Ullmanns (1991). Nitric acid production. *Inorg. Chem. Ind.* 1–7.

Unión Española Fotovoltaica. (2020). Informe anual UNEF 2020. *El sector fotovoltaico hacia una nueva era*.

Van den Broeck, K., Van Hoornick, N., Van Hoeymissen, J., de Boer, R., Giesen, A., & Wilms, D. (2003). Sustainable treatment of HF waste waters from semiconductor industry with a fluidized bed reactor. *IEEE transaction on semiconductor manufacturing*, 16(3), 423-428.

Venkateswari, R., & Sreejith, S. (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376-394.

Wang, T.Y., Hsiao, J.C., Du, C.H. (2012). Recycling of materials from silicon base solar cell module. *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf*, pp. 2355–2358. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318071>.

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). *End of life management: solar photovoltaic panels* (No. NREL/TP-6A20-73852). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75, 450-458.

Yoo, K., Lee, J. C., Lee, K. S., Kim, B. S., Kim, M. S., Kim, S. K., & BD, P. (2012). Recovery of Sn, Ag and Cu from waste Pb-free solder using nitric acid leaching. *Materialstransactions*, M2012268.

Zeng, D. W., Born, M., & Wambach, K. (2004). Pyrolysis of EVA and its application in recycling of photovoltaic modules. *Journal of Environmental Sciences*, 16(6), 889-893.