

**ESTRATEGIAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS
POR LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS EN EL APROVECHAMIENTO DE LA
ENERGÍA SOLAR EN PROYECTOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN
COLOMBIA**

ANDRÉS FELIPE CHAVERRA PADILLA

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ORIENTADOR

**HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA
PHD CIENCIAS – ENERGÍAS RENOVABLES
MSC INGENIERÍA – INGENIERÍA QUÍMICA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTION AMBIENTAL
BOGOTA D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del calificador

Bogotá D.C., Noviembre de 2021

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenieras

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Directora de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospino

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	12
1. COMPOSICIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS	13
1.1. Clase de Paneles Solares	14
1.1.1. Paneles fotovoltaicos de silicio cristalino	15
1.1.2. Paneles de película fina	17
2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS A PARTIR DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR	20
2.1. Clasificación de los Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos	20
3. IDENTIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE PANELES FOTOVOLTAICOS, CONSIDERANDO PRINCIPIOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIAS.	28
3.1. Ahorro de material de los paneles fotovoltaicos gracias a la I+D (reducir)	30
3.2. Reparación de paneles fotovoltaicos (reutilización)	32
3.3. Desmantelamiento y tratamiento de los paneles fotovoltaicos (reciclaje)	33
3.4. Reciclaje	35
<i>3.4.1. Reciclaje de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino</i>	<i>37</i>
<i>3.4.2. Reciclaje de paneles fotovoltaicos de capa fina (CIGS y CdTe)</i>	<i>42</i>
4. ... PROPOUESTA DE ALTERNATIVAS VIABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS EN COLOMBIA.	45
4.1. Directiva RAEE	45

4.1.1. Enfoques Internacionales de Gestión de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos	
47	
4.2. Enfoque Colombiano de Gestión de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos	47
4.3. Colombia y sus futuros proyectos energéticos implementando paneles solares fotovoltaicos.	49
4.4. Alternativas Viables Para el Aprovechamiento de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos Generados al Final de Su Vida Útil.	53
4.4.1. Suministro de Material a Través del Desbloqueo de Materias Primas y Sus Beneficios Económicos	53
4.4.2. Creación de Nuevas Industrias y Empleos Basados en el Sector Fotovoltaico	57
<u>5.</u> CONCLUSIONES	60
<u>6.</u> RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFIA	62

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Representación del sistema solar fotovoltaico	14
Figura 2. Principales tipos de celdas solares fotovoltaicas	15
Figura 3. <i>Panel solar fotovoltaico monocristalino</i>	16
Figura 4. Panel solar fotovoltaico de película fina	17
Figura 5. <i>Materiales que componen los paneles de Película fina delgada según su capa de Estructura</i>	21
Figura 6. Materiales que componen los paneles de C-Si según su capa de estructura	22
Figura 7. Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de tipo silicio cristalino	23
Figura 8. Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo ClGS	24
Figura 9. Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo CdTe	25
Figura 10. Porcentajes de material recuperado de los residuos generados en cada uno de los tipos de paneles	26
Figura 11. Clasificación de residuos de paneles solares fotovoltaicos en Colombia	27
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de las etapas del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos de la cuna a la cuna.	28
Figura 13. Descomposición de paneles solares tipo C-Si y recuperación de diversos materiales	34
Figura 14. Proceso de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos a nivel general	36
Figura 15. Proceso de reciclaje de vidrio laminado	39
Figura 16. Proceso de Recuperación de Metales presente en los Paneles Solares Fotovoltaicos	40
Figura 17. Plan de reciclaje propuesto por NEDO/FAIS	41
Figura 18. Proceso de reciclaje de paneles de película fina	43
Figura 19. Proceso de reciclaje Loser Chemie	44
Figura 20. Caracterización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE según la Directiva RAEE de 2012	49
Figura 21. Parque Solar Castilla	52
Figura 22. Anuncio de nuevos Parques Solares del Grupo Ecopetrol en el 2021	53
Figura 23. Posibles Materias Primas Acumuladas y Recuperadas para el año 2030	55
Figura 24. Creación de valor industrial a partir de la gestión fotovoltaica al final de su vida útil	58

RESUMEN

La energía solar fotovoltaica, es un tipo de energía renovable la cual, utiliza el aprovechamiento de los rayos solares, mediante el almacenamiento de esta energía por parte de celdas o módulos solares en especial de tipo sílice. Este documento presenta un análisis de la energía solar fotovoltaica con la finalidad de definir las estrategias apropiadas para el aprovechamiento de residuos de los paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil, para lo cual se analizarán en el presente trabajo, las generalidades y principales características de los distintos componentes y materiales que presentan los paneles solares fotovoltaicos. Además, se describe la aplicación de las tres (3) R como principio de producción más limpia y su aplicación en el aprovechamiento de los paneles solares al final de su vida útil y la creación de un mercado de valor de materias primas. Con base a lo anterior, se presentan estudios de casos de aplicación de aprovechamiento de países líderes en sistemas fotovoltaicos como lo son Alemania, Reino Unido, Estados Unidos, Japón, China e India, partiendo de la política RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) y políticas de manejo de residuos de dichos países, y su influencia como ejemplo en proyectos energéticos futuros de índole fotovoltaica en Colombia.

Palabras clave: Energía Solar Fotovoltaica, Celda Fotovoltaica, Política RAEE, Energías renovables, Aprovechamiento, Vida útil.

INTRODUCCIÓN

El despliegue de tecnología fotovoltaica ha crecido aceleradamente en los últimos años, alcanzando una capacidad instalada global acumulada de 222 GW a finales de 2015 (IRENA & IEA-PVPS, 2016), lo cual representa el 0,0003% de la energía que se consume anualmente en el mundo. La energía fotovoltaica ofrece una producción de electricidad económica y respetuosa con el medio ambiente, pero, como cualquier tecnología, envejece y, en última instancia, requiere desmantelamiento (que incluye desmontaje, reciclaje y eliminación).

A medida que la energía fotovoltaica se convierte en un producto global, se requiere garantizar su futuro sostenible, para ello las partes interesadas e involucradas en cada paso del ciclo de vida del producto deben implementar procesos y políticas ambientales sólidas incluyendo el tratamiento responsable al final de la vida útil.

Colombia, es un territorio con un potencial muy amplio de riquezas naturales, hoy por hoy el 60% de la economía se basa en la extracción y producción de recursos no renovables, el cual representa impactos ambientales que se deben evitar, mitigar o compensar en la mayoría de las ocasiones, para ello el mundo se prepara para abrir paso a las energías renovables como transición de las actuales energías proveniente de combustibles fósiles, y nuestro país no es la excepción.

Actualmente se evidencian normativas a nivel mundial basadas en la implementación de programas post consumo que involucran a productores, comercializadores y consumidores, de tal forma que se establece la participación de ellos en el ciclo de vida de los paneles solares fotovoltaicos; en dichos programas se plantea en una disposición de residuos de carácter especial dado su origen, para sí evitar que lleguen a los rellenos sanitarios y plantas de aprovechamiento donde se podrían mezclar con residuos orgánicos e inorgánicos, lo que generaría un aumento en el potencial toxicológico de los residuos.

Los paneles solares en Colombia, presenta un mercado emergente de posibilidades energéticas con un panorama enorme en su utilidad y aprovechamiento, y visualizan retos únicos ante la gestión

de sus residuos; debido a que, la normatividad del país establece en forma general requisitos generales sobre el tratamiento de residuos y no especifica lo referente a las celdas fotovoltaicas.

Cuando se aprovecha la energía solar no se genera contaminación directa, pero los colectores de las celdas fotovoltaicas en su proceso de transmisión térmica, contienen a menudo sustancias que pueden producir daños si acceden al medio ambiente.

Otros impactos ambientales se producen durante la fabricación de los materiales que se utilizan para los colectores y celdas solares, por ejemplo, la fabricación del acero, cobre y aluminio (de larga vida y no biodegradables) que a menudo se utilizan como materia prima, generan problemas ambientales por emisiones de polvos y compuestos fluorados, además demandan mucha energía, especialmente en la transformación del aluminio.

Para las celdas solares se utilizan en parte metales raros y tóxicos (cadmio, arsénico, selenio, galio) que durante su procesamiento pueden conducir a problemas (contaminación de las aguas residuales y emisiones de aire contaminado). El riesgo ambiental se limita a las instalaciones donde se produce, pero con el control y medidas preventivas de seguridad es posible minimizar el riesgo, con estrategias de aprovechamiento de los residuos sólidos producidos de las celdas fotovoltaicas.

El motivo de este proyecto, es establecer investigación que contribuya al aprovechamiento de residuos sólidos que generan paneles solares al finalizar su vida útil, en especial los de carácter electrónico y las fibras de sílice que se encuentran en las celdas fotovoltaicas; con el fin de utilizar estrategias de producción más limpia como herramienta principal para la generación de economía circular, analizando los componentes de estas celdas, su eficiencia en los proyectos que se están realizando o que están por venir en nuestro territorio nacional, así como locaciones que permitan el uso potencial de esta fuente energética.

Los países de la Unión Europea (UE) presentan liderazgo por su buena gestión de residuos, más allá de un trato especial de separación y disposición en celdas especiales de almacenamiento, quienes plantean que se debe lograr una línea de reciclaje, recuperación y reincorporación de las

materias primas basadas en un indicadores y metas a partir de las unidades fabricadas y comercializadas cuya estrategia de disposición está promovida por sus fabricantes.

Colombia inicia a abordar este tema, a partir de la firma de los convenios internacionales planteados en el convenio de Basilea en el año de 1989, las cumbres de la tierra de Rio de Janeiro en los años 1992 y 2012, y la posterior conformación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo, a través de la Ley 9 de 1993, estableciendo mecanismos que llevan a la planeación ambiental y el manejo integral de los residuos generados en Colombia; iniciando con lo establecido en el Decreto 1713 de 2002, donde se plantea la definición de lo que es un residuo y su clases de clasificación de acuerdo a las características de éste.

De igual forma se tienen políticas enfocadas al tema de residuos, como lo son la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos (RESPEL), donde se reglamenta lo expuesto en el Decreto 4741 de 2005 para el manejo de residuos sólidos de carácter peligroso.

El país desde el año 2007, cuenta con la Política de Gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), las cuales se ratifican con su inclusión en el Decreto 1076 de 2015 conocido como el Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y su complementación con el Decreto 284 del 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (MADS).

Sin embargo dicha normatividad se queda algo corta para los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares, dado que si bien los contempla por su clasificación de aparatos electrónicos dentro de la política RAEE esta no los especifica, por lo cual su disposición final no se lleva del todo como está estipulada en la normatividad internacional, pues aún se siguen presentando problemáticas asociadas a la mala disposición de ellos por parte de los gestores, terminado estos residuos en rellenos sanitarios mezclados en muchas ocasiones con residuos domésticos, generando problemas de lixiviados, que conllevan a una afectación de las poblaciones y ecosistemas especialmente de fuentes hídricas.

El motivo de este proyecto, es describir los componentes de las celdas fotovoltaicas e identificar estrategias de aprovechamiento de residuos que generan los paneles solares al finalizar su vida útil; debido a que en Colombia estos se presentan como residuos generales y por medio principios de producción más limpia, se puede evitar que dichos residuos genere problemas mayores de contaminación, mediante su aprovechamiento como herramienta principal para la generación de economía circular, resaltando la importancia de la cadena de valor de los residuos de paneles solares fotovoltaicos como fuente de materias primas en la generación de nuevos paneles de esta fuente energética y nuevos productos; y proponer alternativas viables fomentando nuevas industrias a partir de la reducción, reutilización y reciclaje de los paneles solares fotovoltaicos para la implementación de proyectos en Colombia.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar estrategias de aprovechamiento de residuos sólidos producidos por las celdas fotovoltaicas en el aprovechamiento de la energía solar en proyectos de producción más limpia en Colombia.

Objetivos Específicos

- Describir los residuos sólidos a partir de los paneles fotovoltaicos para el aprovechamiento de energía solar
- Identificar estrategias para el aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes de paneles fotovoltaicos, considerando principios de producción más limpias.
- Proponer alternativas viables para el aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes de paneles fotovoltaicos para la implementación de proyectos en Colombia.

1. COMPOSICIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

La energía fotovoltaica o energía solar, es un tipo de energía proveniente de una fuente renovable y de baja emisión de gases de efecto invernadero, ya que esta proviene del calor que produce los rayos del sol, la cual está siempre disponible, no se agota y se puede aprovechar en cualquier momento gracias a que es posible almacenarla, en la **figura 1** se puede ver gráficamente como está conformado un sistema solar fotovoltaico.

Un Sistema Fotovoltaico está compuesto por los siguientes componentes:

- **Bloque de generación:** aquel que está conformado por los paneles fotovoltaicos, el cual su número y tipo de configuración se debe a ciertas condiciones como el valor promedio de insolación del lugar, la carga y la máxima potencia nominal de salida del panel.
- **Bloque de Acumulación:** Parte del sistema fotovoltaico encargada de almacenar y controlar la carga y descarga del sistema, cuenta con banco de baterías, fusibles o llaves de protección y un medidor de carga.
- **Bloque de Carga:** Encargado de suministrar la energía producida por los paneles solares a los equipos que requieran energía eléctrica, este cuenta con inversor y un cableado o red de cables.
(Salamanca, 2017)

Figura 1.

Representación del sistema solar fotovoltaico



Nota. La figura representa el sistema solar fotovoltaico. Tomado de: *Como Funciona*, (s.f.), Como Funciona el sistema fotovoltaico. <https://como-funciona.co/el-sistema-fotovoltaico/>

1.1.Clase de Paneles Solares

Para conseguir un tratamiento óptimo de los residuos para las distintas categorías de productos fotovoltaicos, hay que tener en cuenta la composición de los paneles fotovoltaicos.

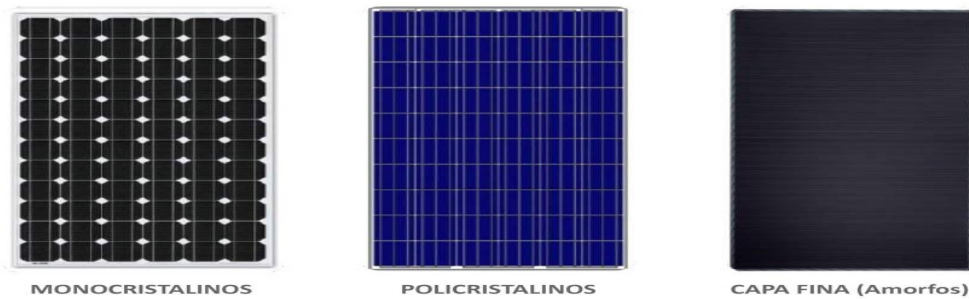
Los distintos tipos de tecnología suelen diferir en cuanto a los materiales utilizados en su fabricación y pueden contener distintos niveles de sustancias peligrosas que se deben tener en cuenta durante su manipulación y procesamiento, como pueden verse en la **figura 2**, que presenta los principales tipos de celdas solares fotovoltaicas.

La tecnología fotovoltaica C-Si (Silicio Cristalino) es la más antigua y actualmente domina el mercado con alrededor del 92% de la cuota de mercado. Los paneles C-Si se dividen en dos tipos, de silicio multicristalino los cuales tienen una cuota del 55% y los de silicio monocristalino del 45% de la tecnología c-Si, respectivamente. Debido a los bajos ratios de eficiencia, los productos de a-Si (Silicio Amorfo) se han dejado de fabricar en los últimos años, y su cuota de mercado es actualmente insignificante (International Renewable Energy Agency – IRENA - & Agencia Internacional de Energías -IEA-PVPS -, 2016, p. 38).

Existe otra tecnología de paneles fotovoltaicos de capa fina representan el 7% del mercado fotovoltaico, y estos se dividen dos en el cual el 2% de los paneles son de CIGS (cobre, indio, galio y selenio) y el 5% son los de CdTe (telururo de cadmio). Existe otra tecnología llamada CPV(células fotovoltaicas orgánicas) pero no se tendrá en cuenta en esta monografía porque su cuota de mercado es baja, inferior al 1% (International Renewable Energy Agency – IRENA - & Agencia Internacional de Energias -IEA-PVPS -, 2016, p. 38).

Figura 2.

Principales tipos de celdas solares fotovoltaicas



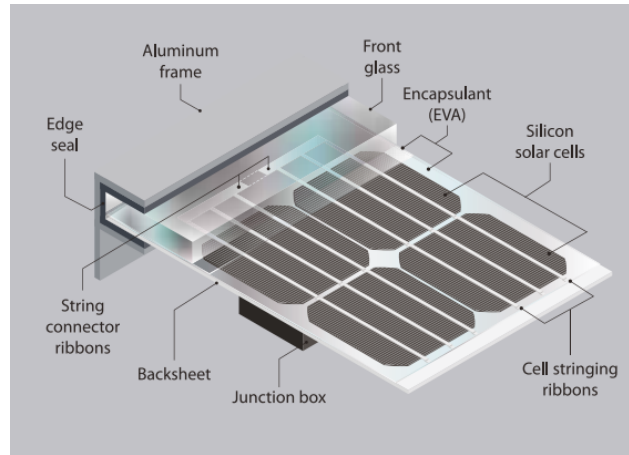
Nota. La figura representa los principales tipos de celdas solares fotovoltaicas. Tomada de: ECOFENER, 2019, Tipo de paneles solares. <https://ecofener.com/blog/tipos-de-paneles-solares/>

1.1.1. Paneles fotovoltaicos de silicio cristalino

En peso, los paneles fotovoltaicos de tipo c-Si contienen hoy en día alrededor de un 76% de vidrio (superficie del panel), un 10% de polímero (encapsulante y lámina posterior), un 8% de aluminio (principalmente el marco), un 5% de silicio (células solares), un 1% de cobre (interconectores) y menos de un 0,1% de plata (líneas de contacto) y otros metales (principalmente estaño y plomo) (IRENA 2016), los cuales pueden detallarse en la **figura 3**, que ilustra la composición de un panel solar fotovoltaico monocristalino.

Figura 3.

Panel solar fotovoltaico monocristalino



Nota. La figura representa el panel solar fotovoltaico monocristalino. Tomado de: IRENA & IEA-PVPS, 2016, p. 39. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

La tecnología c-Si consiste en láminas de silicio de grado solar, también conocidas como obleas, que se convierten en celdas y luego se ensamblan en paneles y se conectan eléctricamente. La celda estándar consiste en una lámina con una unión pn altamente dopada. La superficie suele estar texturizada y puede presentar estructuras piramidales (silicio monocristalino) o aleatorias (silicio policristalino) y una capa antirreflectante para minimizar la reflexión de la luz.

Los estudios sobre las tendencias de la industria, como el International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), sugieren que prevalecerán las nuevas tecnologías de proceso, fomentando laminas más finas y flexibles, así como estructuras de células más complejas y múltiples.

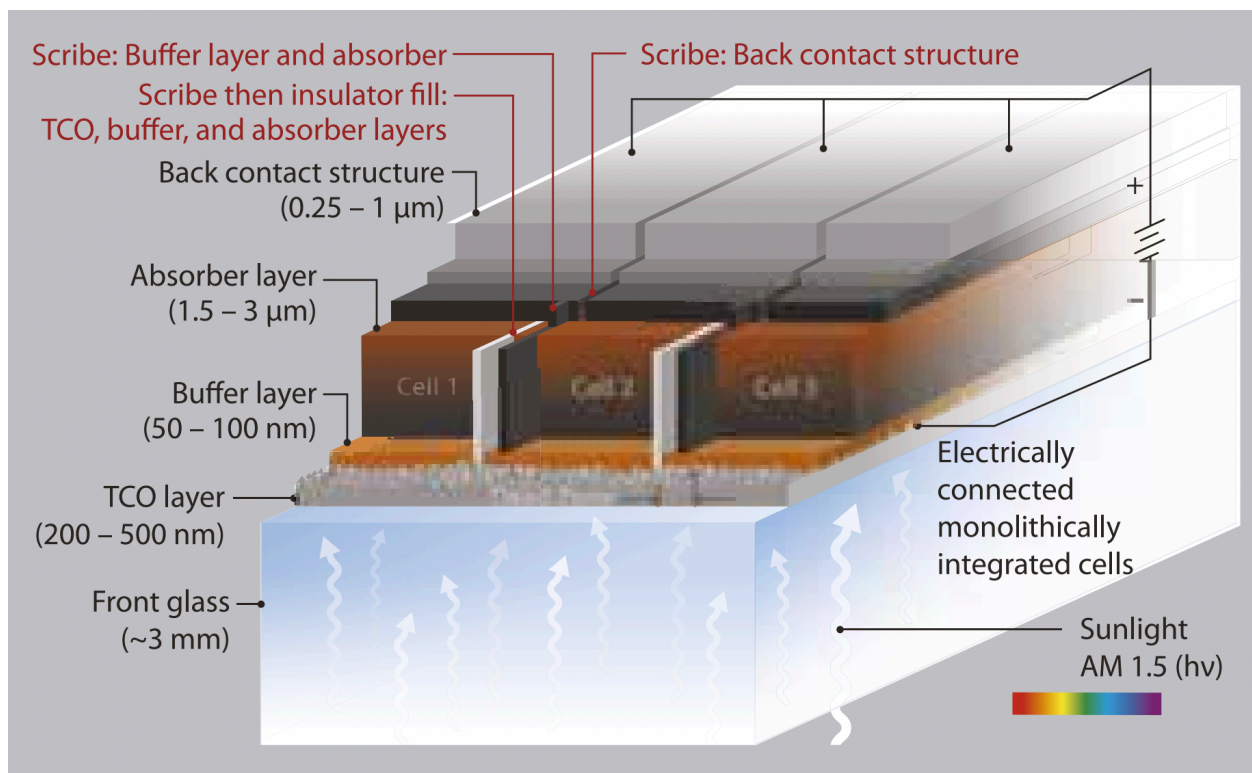
Para 2030 se prevé que el contenido de vidrio de los paneles c-Si aumente un 4% hasta alcanzar un total del 80% del peso del panel. Los principales ahorros de material incluirán una reducción del silicio del 5% al 3%, una disminución del 1% en aluminio y una muy ligera reducción del 0,01% en otros metales. Se espera que el consumo específico de plata se reduzca aún más gracias a la mejora de los procesos de metalización y la sustitución por capas de cobre o níquel/cobre (Raithel, 2014).

1.1.2. Paneles de película fina

Los paneles de película fina están formados por finas capas de material semiconductor depositadas sobre grandes sustratos como el vidrio, el polímero o el metal. Las tecnologías de paneles fotovoltaicos de capa fina pueden dividirse en dos categorías principales: CIGS y CdTE, la **figura 4**. Ilustra la composición de un panel solar fotovoltaico de película fina.

Figura 4.

Panel solar fotovoltaico de película fina



Nota. La figura representa el panel solar fotovoltaico de película fina. Tomado de: IRENA & IEA-PVPS, 2016, p. 40. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

Los paneles CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio) utilizan la alta absorción de luz como semiconductor directo. El ajuste del espectro luminoso se realiza variando las proporciones de los distintos elementos del semiconductor compuesto (por ejemplo, indio, galio y selenio). El compuesto tiene muy buenas propiedades de absorción de la luz, por lo que se necesitan capas de

semiconductor mucho más finas para lograr eficiencias similares a las de los paneles de C-Si (de ahí el término capa fina).

La fotovoltaica CdTe (teluro de cadmio) describe una tecnología fotovoltaica (PV) que se basa en el uso de teluro de cadmio, una delgada capa semiconductor diseñada para absorber y convertir la luz solar en electricidad.

Los paneles de capa fina son tecnológicamente más complejos que los paneles fotovoltaicos de silicio, es probable que el contenido de vidrio de los paneles de c-Si aumente de aquí a 2030. Según Marini (2014) es viable que disminuya el silicio en los paneles de capa fina, al utilizar materiales de vidrio más finos y estables, esto fomentará una mayor proporción de semiconductores compuestos y otros metales Woodhouse (2013).

Los paneles CIGS se componen hoy en día de un 89% de vidrio, que disminuirá un 1% hasta el 88% en 2030, un 7% de aluminio, que aumentará un 1% en 2030, y un 4% de polímero que permanecerá estable, y experimentarán una ligera reducción del 0,02% en otros metales (10% de cobre, 28% de indio, 10% de galio y 52% de selenio), pero un aumento del 0,2% en semiconductores (Pearce, 2014). De acuerdo con Raithel (2014) los paneles CIGS presenta una eficiencia del 15% y su objetivo es alcanzar el 20% o más a largo plazo.

Los paneles de CdTe se espera que la proporción de vidrio como masa total del panel para 2030 disminuya en un 1%, del 97% a 96, y su masa de polímero de polímeros aumente en un 1%, del 3% al 4%, en comparación con la actualidad. A diferencia con los paneles de CIGS, el uso de materiales para semiconductores como proporción del uso de paneles disminuirá casi a la mitad, del 0,13% al 0,07%; sin embargo, la proporción de otros metales (por ejemplo, níquel, zinc y estaño) crecerá del 0,26% al 0,41% según Marini (2014), la principal razón de este aumento de otros metales será la mayor reducción en el grosor de la capa de CdTe que hace bajar el contenido de semiconductor en el semiconductor base.

Un panel fotovoltaico cristalino típico con marco de aluminio y 60 celdas tiene una capacidad de 270 vatios pico (Wp) y pesa 18,6 kilogramos (kg) (por ejemplo, Trina Solar TSM-DC05A.08). En

el caso de un panel CdTe estándar, se puede suponer una media de 110 Wp para un peso de 12 kg (por ejemplo, First Solar FS-4100). Un panel CIGS suele tener una capacidad de 160 Wp y 20 kg (por ejemplo, Solar Frontier SF160-S) (IRENA & IEA-PVPS, 2016, p.41).

2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS A PARTIR DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR

2.1. Clasificación de los Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos

La clasificación de los residuos de paneles fotovoltaicos sigue los principios básicos de la clasificación de residuos.

También se tiene en cuenta la composición del material por masa o volumen y las propiedades de los componentes y materiales utilizados (por ejemplo, solubilidad, inflamabilidad, toxicidad), al igual que las posibles vías de movilización de los componentes y materiales en los distintos escenarios de reutilización, recuperación, reciclaje y eliminación (por ejemplo, la lixiviación de los materiales a las aguas subterráneas o la admisión de partículas en el suelo).

El objetivo general de estos principios de clasificación es identificar los riesgos para el medio ambiente y la salud humana que podría causar un producto durante su gestión al final de su vida útil.

En función de la normativa nacional e internacional, como el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (Organización de las Naciones Unidas, 2016), los residuos pueden clasificarse en varias categorías, como residuos inertes, residuos no peligrosos y residuos peligrosos.

En 2015, dos tercios de los paneles fotovoltaicos instalados en todo el mundo eran paneles de c-Si. Normalmente, más del 90% de su masa está compuesta por vidrio, polímero y aluminio, que pueden clasificarse como residuos no peligrosos, en la **tabla 1** y **tabla 2** se presentan los componentes de los paneles tipo C-Si y de película delgada según su capa estructural y las **figuras 5, 6 y 7** presentan el porcentaje de composición en peso (Wt):

Figura 5.

Materiales que componen los paneles de Película fina delgada según su capa de Estructura

# de Capas	Nombre de la Capa	Materiales de Composición	Componentes Químicos
1	Vidrio Protector	Fabricado de vidrio Templado Sosa	Sodio
2	Encapsulante	Conformado con el polímero Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Cal Sílice
3	Celdas Solares e Interconexiones mecánicas	Están hechas de cintas metálicas	Hierro Etileno Acetato de vinilo
4	Cubierta Posterior	Láminas de aluminio	Selenio Galio
5	Marco	Fabricado de aluminio anonizado	Indio Plata Cadmio Telurio de Aluminio Aluminio

Nota. La figura representa la Descripción de las capas que conforman un panel solar de película fina y sus distintos materiales de conformación. Adaptado de: Chaparro,2019.

Figura 6.

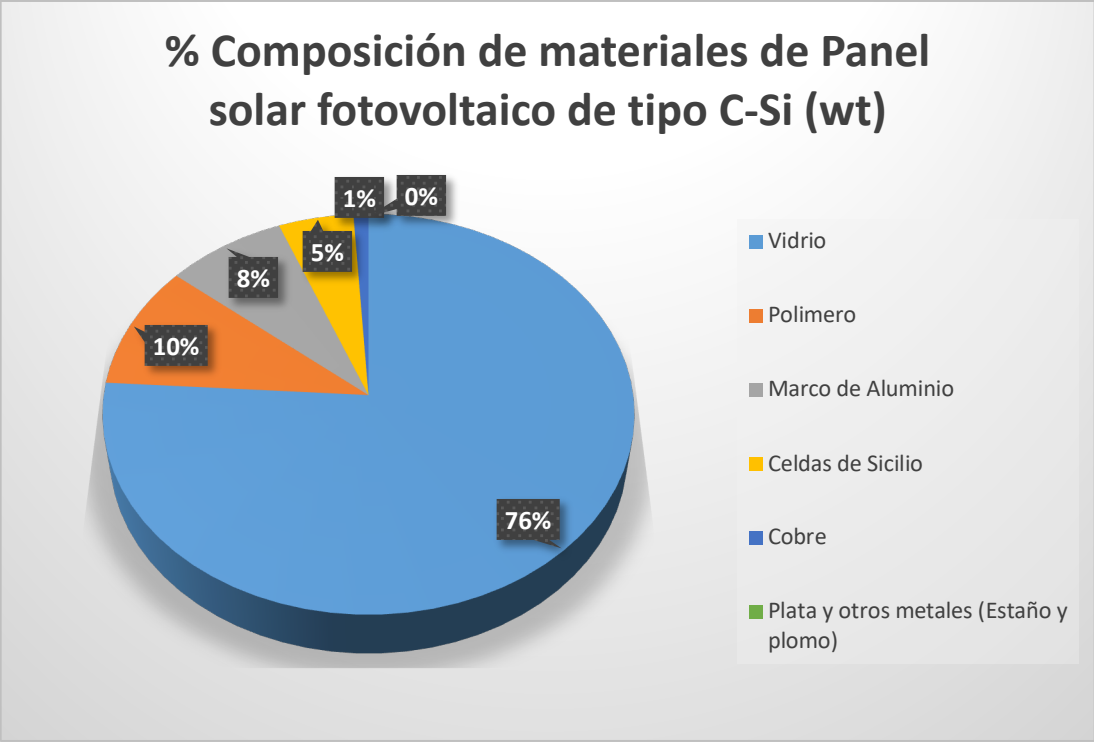
Materiales que componen los paneles de C-Si según su capa de estructura

# de Capas	Nombre de la Capa	Materiales de Composición	Componentes Químicos
1	Vidrio Protector	Fabricado de vidrio Templado Sosa	Sodio
2	Encapsulante	Conformado con el polímero Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Cal Sílice
3	Celdas Solares e Interconexiones mecánicas	Están hechas de cintas metálicas	Hierro Etileno
4	Cubierta Posterior	Subcapa1: polivinilo Fluoruro (TEDLAR) Subcapa2: Tereftalato de Polietileno (poliéster) Subcapa3: polivinilo Fluoruro (TEDLAR)	Acetato de vinilo Silicio Plata Aluminio Plomo Estaño Polivinilo Fluoruro
5	Marco	Fabricado de aluminio anonizado	Teraftalato de polietileno
6	Cubierta Posterior Final	Se fabrica con el polímero polifeniléneter	Aluminio

Nota. La figura representa la descripción de las capas que conforman un panel solar de tipo silicio cristalino y sus distintos materiales de conformación. Adaptado de: Chaparro, 2019.

Figura 7.

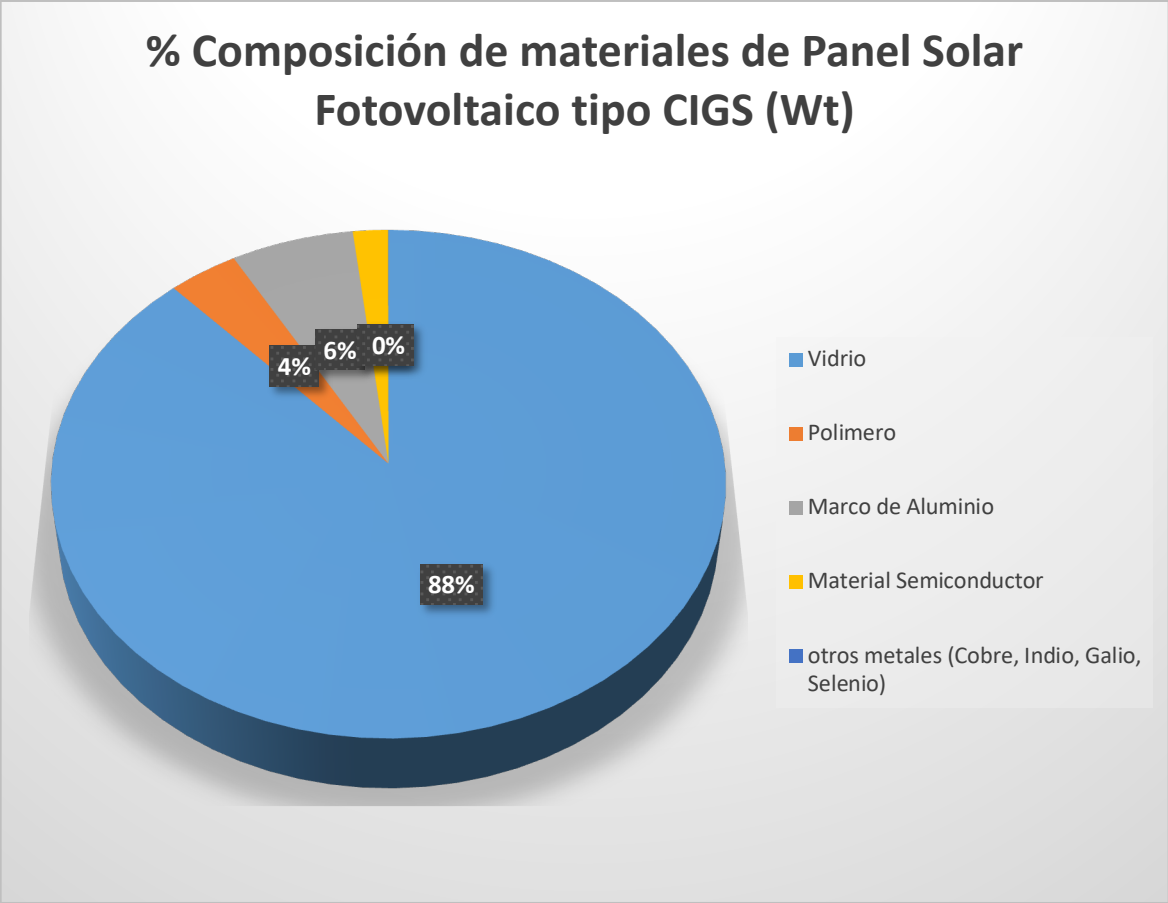
Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de tipo silicio cristalino



Nota. La figura muestra los porcentajes de composición en peso de los materiales de un panel solar fotovoltaico de tipo silicio cristalino. Adaptado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

Figura 8.

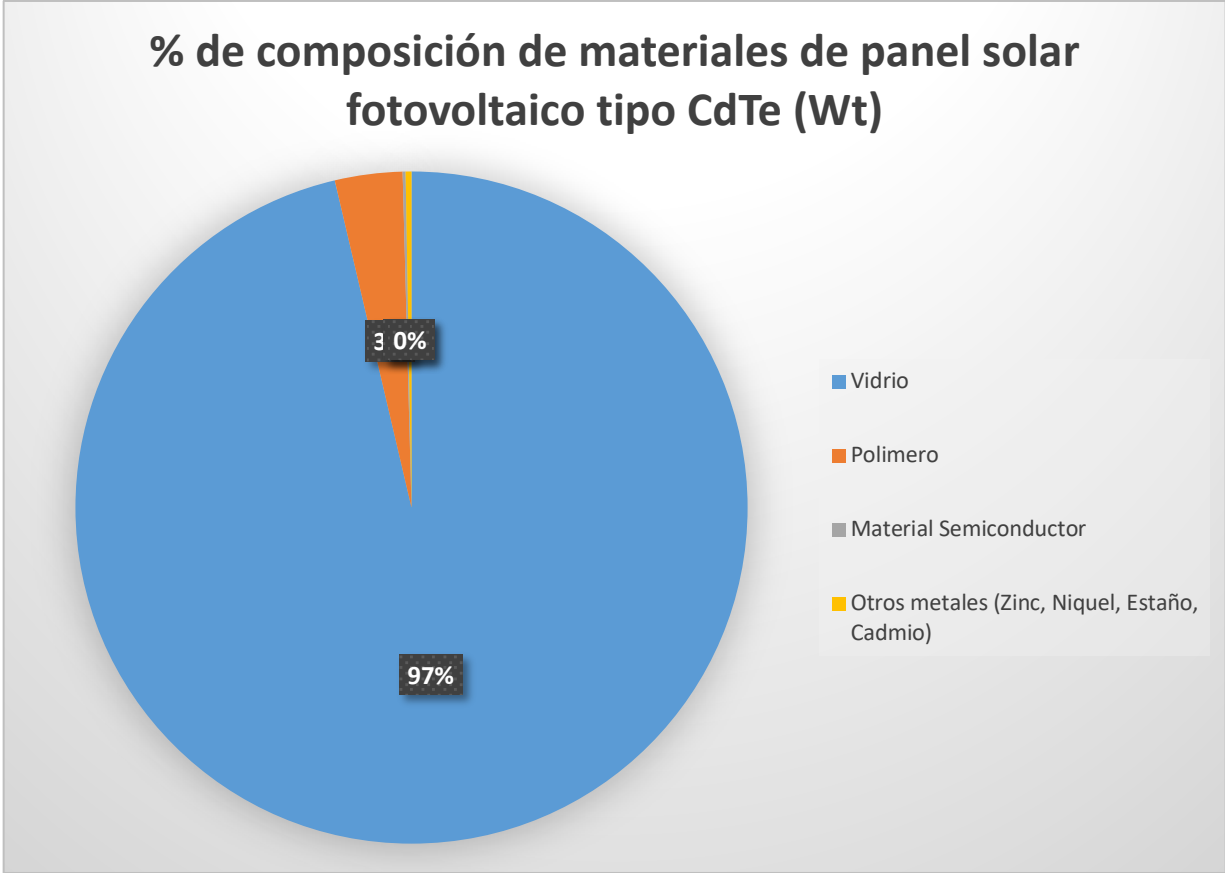
Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo CIGS



Nota. La figura muestra los porcentajes de composición en peso de los materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo CIGS. Adaptado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

Figura 9.

Porcentaje de composición en peso de materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo CdTe

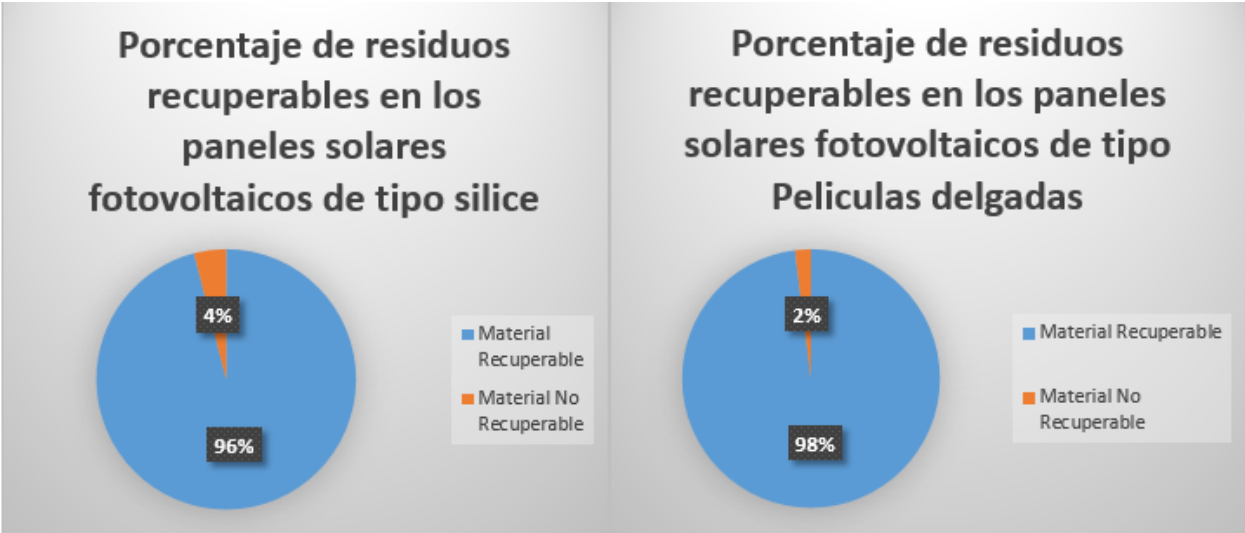


Nota. La figura muestra los porcentajes de composición en peso de los materiales de un panel solar fotovoltaico de película fina tipo CdTe. Adaptado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

De acuerdo a esta clasificación y composición de materiales y componentes que se presentan los residuos, en la **figura 8**, se ha determinado el porcentaje de materiales recuperados de los residuos generados en los paneles solares fotovoltaicos, de acuerdo al trabajo de Chaparro, 2019.

Figura 10.

Porcentajes de material recuperado de los residuos generados en cada uno de los tipos de paneles



Nota. La figura muestra los porcentajes de recuperación de residuos generados y el porcentaje no recuperado en cada uno de los tipos de paneles fotovoltaico. Adaptado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

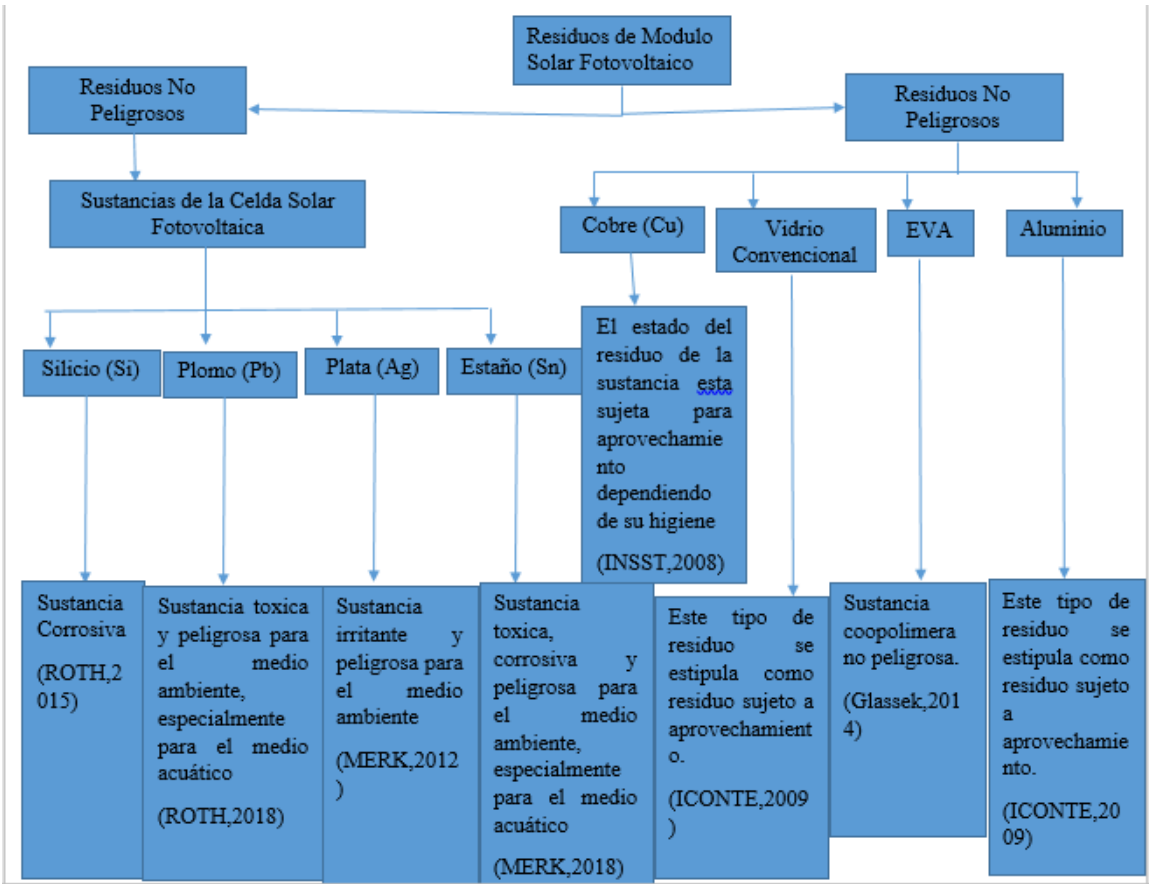
Desde el punto de vista normativo, los residuos de los paneles fotovoltaicos siguen entrando en la clasificación general de residuos, a excepción de la Unión Europea en la cual los residuos de paneles solares fotovoltaicos, se definen como residuos electrónicos dentro su Directiva RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), la cual se define como los aparatos diseñados para ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1.000 V para la corriente alterna y 1.500 V para la corriente continua, o los aparatos que dependen de corrientes eléctricas o campos electromagnéticos para funcionar correctamente, o los aparatos para la generación de dichas corrientes, o los aparatos para la transferencia de dichas corrientes, o los aparatos para la medición de dichas corrientes (Unión Europea , 2012).

Colombia como país cuenta con una política RAEE, pero en esta no se tienen en cuenta este tipo de residuos de paneles solares fotovoltaicos, por lo que los residuos de paneles solares fotovoltaicos entrarían en la categoría de residuos generales o de acuerdo a materiales de composición que generan residuos tóxicos, se podrían considerar de igual manera como residuos peligrosos

El criterio de clasificación de los residuos de paneles solares fotovoltaicos, depende mucho de la normativa presente en relación al país o nación, en donde se presenten dichos residuos, muchos autores en términos de evaluación de ciclo de vida de residuos, estipulan o clasifican los paneles solares fotovoltaicos como clasificación general de residuos peligrosos y no peligroso, en la **figura 9**, se presenta la clasificación general de los residuos de paneles solares fotovoltaicos en Colombia.

Figura 11.

Clasificación de residuos de paneles solares fotovoltaicos en Colombia



Nota. La figura muestra la clasificación de los residuos de paneles solares fotovoltaicos con datos de seguridad estipulados en la ficha de seguridad y clasificación relacionada con la GTC 24 de ICONTEC. Tomado de: Rodríguez (2018).

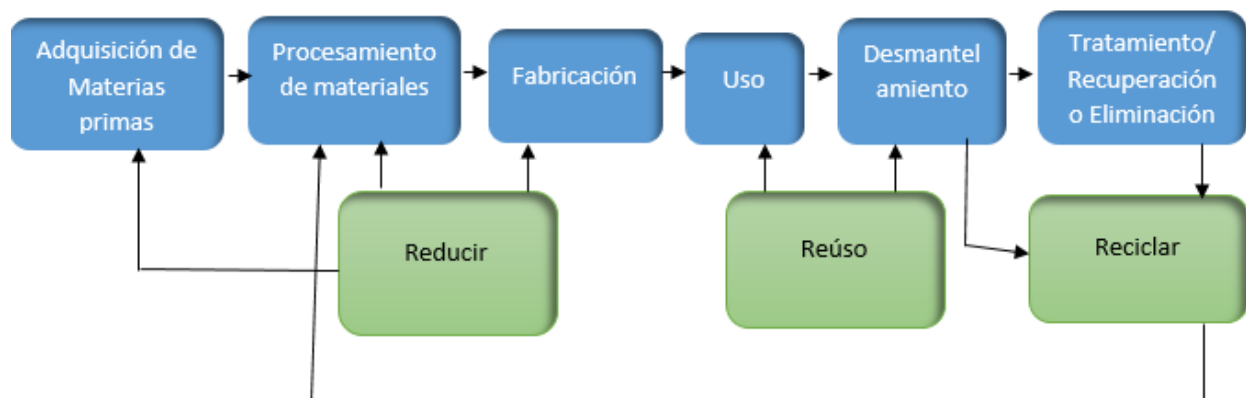
3. IDENTIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE PANELES FOTOVOLTAICOS, CONSIDERANDO PRINCIPIOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIAS.

Según IRENA (2016) los enfoques de gestión de residuos se basan en las fases de un ciclo de vida de un determinado producto, para el caso de los paneles solares fotovoltaicos el ciclo empieza con la extracción de las materias primas o como se le conoce a esta etapa “cuna” y culmina con la eliminación de estos, comúnmente llamada “tumba” (Braungart y McDonough, 2002).

A este ciclo de vida de economía lineal, se presenta la búsqueda y elaboración de estrategias de producción más limpias, “al considerar la contaminación como una consecuencia de la ineficiencia de los procesos y de las tecnologías, que a su vez dependen de sus estructuras y su capacidad económica” (IRENA & IEA-PVPS, 2016, p.17) ayudando a la competitividad y sistemas en el interior de las empresas para la posible reducción, reutilización y reciclaje de dichos residuos, mediante esta regla de las tres R y la generación de economía circular, como se puede ver en la **figura 10**, presentando un diagrama de flujo, donde se establece un ciclo distinto con un enfoque de producción más limpia el cual será priorizado como “de la cuna a la cuna”.

Figura 12.

Diagrama de flujo del proceso de las etapas del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos de la cuna a la cuna.



Nota. La figura muestra las oportunidades resultantes para reducir, reutilizar o reciclar de residuos al final de la vida útil de los paneles fotovoltaico. Tomado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

(International Renewable Energy Agency – IRENA - & Agencia Internacional de Energías -IEA- PVPS -, 2016, p. 47).

Existen oportunidades de creación de valor en cada segmento de la cadena de valor fotovoltaica, incluido su fin de vida útil, debido al fuerte crecimiento del mercado se prevé que para el año 2030 los residuos de paneles solares fotovoltaicos sean alrededor de 1,7 millones de toneladas y estos aumenten drásticamente a 60 millones de toneladas para el año 2050 (IRENA,2016), por lo que la generación de residuos de paneles solares fotovoltaicos va en ascenso, por ello es necesario que estas estrategias de aprovechamiento fomenten un sistema de economía circular y aplicabilidad de la regla de las 3R.

- **Reducir:** Para el caso de los paneles debemos tratar de reducir o simplificar el consumo de componentes que afectan la vida útil del panel, dado que consumo total de materiales raros y valiosos aumentará a medida que crezca el mercado fotovoltaico, la disponibilidad y los precios impulsarán los esfuerzos de reducción y sustitución (IRENA & IEA-PVPS,2016).
- **Reutilizar:** Consiste en darle nueva utilidad, previo al acondicionamiento del mismo, radicando su mayor limitación en la cantidad máxima de ciclos de reutilización a los que puede ser sometido, ya que en cada uno de ellos el material sufre un proceso de degradación. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampeña, s.f).
- **Reciclar:** Se basa en la reprocesamiento del material para la obtención de uno de menor valor; la calidad del material obtenido depende de la calidad del que ha sido reprocesado. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampeña, s.f) Los materiales residuales son transformados mediante procesos fisicoquímicos para convertirlos en productos que vuelven al mercado.

De acuerdo a la regla de las 3R se puede identificar las siguientes estrategias de aprovechamiento:

3.1. Ahorro de material de los paneles fotovoltaicos gracias a la I+D (reducir)

La mezcla de materiales de los paneles fotovoltaicos no ha cambiado significativamente en el pasado. Sin embargo, se ha conseguido un ahorro de material gracias a la mayor eficiencia de recursos y materiales. Por ejemplo, el ahorro de materiales e incluso sustituciones se han investigado, y se siguen investigando, para el plomo, el cadmio y el selenio, de manera que se pueda reducir la cantidad de materiales peligrosos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

La eficiencia de los recursos o de los materiales significa utilizar los limitados recursos del mundo de forma sostenible, minimizando el impacto en el medio ambiente, esto permite crear más valor (por ejemplo, productos) con menos insumos (por ejemplo, recursos o materiales). En el caso de los demás materiales utilizados en las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos, la investigación se centra principalmente en la reducción de los costes de producción.

En el capítulo anterior se compara la composición en porcentaje de peso (%wt) de los distintos tipos de paneles solares, con respecto a ello los trabajos de I+D han establecido específicamente temas prioritarios para la reducción del uso de materiales o la sustitución de diferentes componentes utilizados habitualmente en los paneles fotovoltaicos actuales, entre ellos:

- Paneles c-Si: vidrio, polímero, silicio, aluminio, plata y plomo y otros;
- Paneles CIGS: vidrio, polímero, aluminio, cadmio, galio, indio, selenio y otros;
- Paneles CdTe: vidrio, polímero, telurio de cadmio, níquel y otros.

Esto incluye la búsqueda de nuevos materiales y sustitutos para una mejor eficiencia de los paneles y minimizar la degradación ambiental:

- Nuevas capas de óxido conductoras transparentes que incorporan compuestos más abundantes y, por tanto, más baratos, como el óxido de estaño dopado con flúor, pueden sustituir al óxido de indio y estaño como electrodos frontales (Calnan, 2014). Esto reduce el uso del indio en el óxido de indio-estaño disponible en algunas tecnologías fotovoltaicas de capa fina como óxido conductor transparente.

- Mayor optimización de la composición del vidrio, el grosor, el revestimiento anti reflectante y las estructuras de la superficie aumentará la transmisión de los cristales frontales en un 2% más de aquí a 2024. El uso de dos milímetros de espesor o incluso menos en un laminado de un solo panel requerirá un esfuerzo adicional de esfuerzo de estabilización mecánica adicional que podría lograrse mediante paneles de doble vidrio con una fina capa de encapsulamiento (Raithel, 2014).
- Los encapsulante y las láminas posteriores no se reciclan hoy en día porque los materiales duroplásticos que dominan el mercado no pueden disolverse o fundir para su reciclaje sin que se descompongan. La investigación busca reducir o sustituir la cantidad de polímeros, especialmente en el caso de las láminas traseras que utilizan una lámina de tereftalato de polietileno. Éstas contienen hasta unos cientos de partes por millón de antimonio utilizado como catalizador de polimerización (Ramaswami, 2014).
- Celdas más finas que pueden reducir la cantidad de silicio utilizado en las celdas de c-Si. Por ejemplo, al pasar a un diseño de celda de contacto trasero, el uso de silicio podría reducirse a la mitad, y el consumo de energía podría reducirse en un 30% aproximadamente (Raithel, 2014).
- La industria fotovoltaica consume alrededor del 3,5%-15% de la producción mundial de plata (Berry, 2014). Las cifras más altas de este rango incluyen las pérdidas de producción, mientras que las cifras más bajas resultan del análisis del contenido de plata de las celdas solares. Por término medio, un panel típico de c-Si contiene entre 6 y 10 gramos de plata. El uso de celdas de contacto trasero o bifaciales puede ayudar a reducir aún más el consumo de plata por vatio (W) al mejorar la eficiencia de las celdas (Raithel, 2014).

Estudios recientes coinciden en que la disponibilidad de materiales fotovoltaicos no es una preocupación importante a corto plazo, aunque los materiales críticos podrían imponer limitaciones a largo plazo. Además, el aumento de los precios mejorará la economía de las actividades de reciclaje e impulsará la inversión en procesos mineros más eficientes. Esto

incluye la extracción de metales utilizados en el proceso de fabricación de la energía fotovoltaica, como la plata, el aluminio, el cobre y el estaño (Marini et al., 2014).

3.2.Reparación de paneles fotovoltaicos (reutilización)

A medida que el tiempo avanza, se merma la vida útil de los paneles solares, la cual tiene un tiempo estimado de vida útil de 30 años, si se descubren defectos durante la fase inicial de la vida útil de un panel fotovoltaico, los clientes pueden intentar reclamar garantías para la reparación o sustitución siempre que el socio contractual todavía exista. Debido a esto, las compañías de seguros podrían intervenir para compensar una parte o la totalidad de los costes de reparación/sustitución en el marco de los acuerdos contractuales.

En estos casos, la propiedad de los paneles suele pasar a la compañía de seguros. Por lo tanto, la mayoría de los paneles defectuosos se devuelven al socio contractual, o al propio productor para su inspección y reparación (IRENA, 2016).

Para recuperar algún valor de un panel devuelto a través de la reventa, hay que hacer pruebas de calidad comprobando principalmente la seguridad eléctrica y la potencia, esto permitiría saber si el panel es apto para ser reutilizado o reciclado, utilizando pruebas tales como:

- **Flash test list:** Es una prueba que consiste en aplicar al panel una fuente de luz emitida por un **simulador de luz de sol a 1000W/m² y a 25°C de temperatura ambiente** y se recogen los datos eléctricos (potencia, tensión de vacío, Intensidad de cortocircuito, etc.) de cada módulo asociado al número de serie del módulo que lo identifica. Los **paneles que no cumplen** con los valores esperados, **se descartan** (*Greening-e Smart Service Solutions, Técnicas de evaluación de calidad de módulos fotovoltaicos*, 2020).
- **Prueba de electroluminiscencia:** En esta prueba se someten los módulos a una corriente eléctrica y se fotografían con una cámara de infrarrojos, con esta prueba se puede determinar

si hay problemas en las celdas solares que componen el módulo (*Greening-e Smart Service Solutions, Técnicas de evaluación de calidad de módulos fotovoltaicos, 2020*).

- **Pruebas Hot Spots o de puntos calientes:** con esta prueba se determina si existen **problemas de microrroturas** en la lámina que forma las celdas. Estos pueden originar en el futuro ‘**hot spots**’ una vez que los módulos se ponen en funcionamiento. El ‘**hot spot**’ o **punto caliente** se localiza en **microrroturas** en el seno de las celdas. Estas microrroturas se transforman en pequeñas resistencias que disipan energía en forma de calor cuando los módulos están en producción. Si esto ocurre, estos módulos también **son desechados** (*Greening-e Smart Service Solutions, Técnicas de evaluación de calidad de módulos fotovoltaicos, 2020*).

Cuando las reparaciones son necesarias y factibles, suelen implicar la aplicación de un nuevo marco, una nueva caja de conexiones, la sustitución de diodos, nuevos enchufes y tomas de corriente, etc. Incluso pueden sustituirse las celdas solares y relaminarse los paneles, como alternativa pueden revenderse como paneles usados a un precio de mercado reducido de aproximadamente el 70% del precio de venta original en comparación con los paneles nuevos.

Si un sistema fotovoltaico se desmonta después de su vida útil nominal, estos paneles pueden reutilizarse después de una comprobación de calidad y una renovación. Esto crea una buena oportunidad para un importante mercado secundario de paneles usados y nuevos trabajos de servicio de reparación en el futuro.

Esta opción nos provee un mercado de segunda mano que puede tener un uso interesante y eficiente para procesos de talla doméstica o en procesos productivos energéticos de pequeña escala.

Los paneles que no se puedan reparar o reutilizar se desmontarán y se enviarán a empresas locales de tratamiento de residuos para su posterior procesamiento de acuerdo con la normativa local.

3.3.Desmantelamiento y tratamiento de los paneles fotovoltaicos (reciclaje)

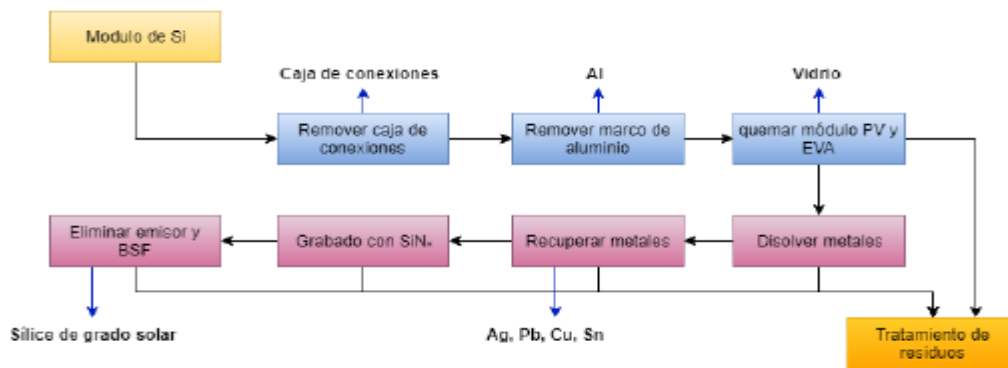
El desmontaje y desarticulación de paneles solares genera un panorama económico de prestación de servicio, el cual se presenta como la futura generación de empresa en este campo teniendo en

cuenta que tipos y tamaños de los sistemas fotovoltaicos instalados tienen importantes implicaciones para la futura gestión de residuos.

Por ejemplo, la proliferación de pequeños sistemas fotovoltaicos en tejados muy dispersos puede añadir costes significativos al desmontaje, la recogida y el transporte de los paneles fotovoltaicos caducados. En cambio, la gestión de los residuos de las aplicaciones fotovoltaicas de gran tamaño es más fácil desde el punto de vista logístico (IRENA,2016); la **figura 11**, muestra el procedimiento de desmontaje y recolección de componentes de un panel solar fotovoltaico al final de su vida útil.

Figura 13.

Descomposición de paneles solares tipo C-Si y recuperación de diversos materiales



Nota. La figura representa el procedimiento de desmontaje y recuperación de componentes de un panel solar fotovoltaico de tipo silicio cristalino. Tomado de: Briñez (2019).

Es importante identificar los diferentes escenarios para la recolección de paneles fotovoltaicos en función del tamaño y la ubicación geográfica los cuales son:

Los sistemas a escala comercial (> 100 kW), que suelen estar montados en el suelo, con mantenimiento y control periódicos. Los paneles pueden colocarse en bastidores de aluminio o acero con bases de hormigón. El sistema eléctrico se basa en inversores de cadena o centrales con conexión a la red. En algunos casos puede haber incluso un sistema de almacenamiento de energía, que puede estar basado en baterías de iones de litio, baterías de plomo o de otras tecnologías (IRENA & IEA-PVPS,2016).

El desmantelamiento, el embalaje, el transporte y el reciclaje pueden ser fácilmente para partes o para todo el sistema. Los componentes de la planta fotovoltaica se almacenarán por separado: paneles, cables, componentes electrónicos (inversores, reguladores de carga transformadores, electrónica de control, etc.), metales (aluminio, acero) etc.), edificios típicos y residuos de construcción y demolición, etc. Las cantidades de los diferentes residuos son relativamente altas y pueden recogerse fácilmente por separado a un coste razonable para su transporte a recicladores especializados o a vertederos (Brellinger, 2014).

Dependiendo de la normativa local, algunos componentes -por lo general algunas baterías o transformadores de potencia pueden considerarse residuos peligrosos o tóxicos.

Los costes de desmantelamiento de **las instalaciones más pequeñas (5-100 kW)** dependen del tipo de sistema fotovoltaico (terrestre, BIPV, sobre tejado, etc.) y de la ubicación. El desmantelamiento de las pequeñas instalaciones fotovoltaicas puede requerir trabajadores cualificados, como techadores y electricistas. Los paneles individuales, los pequeños **sistemas domésticos de un solo panel (< 500 W)** u **otros sistemas pequeños (< 5 kW)** pueden devolverse mediante servicios de recogida o entrega (IRENA & IEA-PVPS,2016).

Hay que evitar que los paneles fotovoltaicos sufran daños durante el desmantelamiento, el transporte y el almacenamiento para tratamiento de residuos con las mejores tecnologías disponibles y los mejores resultados posibles. Los cables, cajas de conexión y marcos no deben retirarse durante el desmontaje. Estos pueden requerir una atención especial por su valor como material secundario y, posiblemente, de acuerdo con requisitos legales locales (Wambach et al., 2009).

3.4. Reciclaje

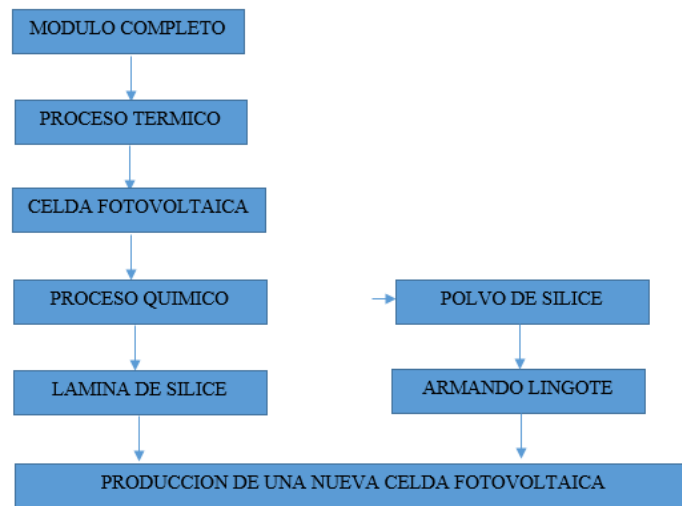
Uno de los principales retos técnicos del reciclaje fotovoltaico es la deslaminación o la eliminación del material encapsulante (por ejemplo, etilvinilacetato). Se han explorado varios métodos para la deslaminación efectiva, incluyendo la trituración mecánica (Giachetta et al., 2013), el

procesamiento térmico (Wang et al., 2012), los disolventes orgánicos (Kang et al., 2012), la pirólisis y el chorro de vacío (Berger et al., 2010), las microemulsiones (Marwede y Reller, 2012) y la radiación ultrasónica (Kim y Lee, 2012).

El objetivo principal de este proceso es el de recuperar los principales componentes como el vidrio, el aluminio, el cobre como se pudo observar en la **figura 11** y otros materiales potencialmente escasos o valiosos (como la plata o el indio) y la calidad suficiente para su venta en el mercado mundial o para la generación de nuevos paneles solares como se observa en la **figura 12**. También pueden tener que manejar cantidades modestas de materiales peligrosos y tóxicos (por ejemplo, el cadmio).

Figura 14.

Proceso de reciclaje de paneles solares fotovoltaicos a nivel general



Nota. La figura representa el reciclaje de paneles solares fotovoltaicos. Tomado de: Briñez (2019).

Los siguientes puntos son importantes para diseñar cualquier sistema futuro de reciclaje de residuos de paneles fotovoltaicos, independientemente de la tecnología fotovoltaica utilizada, ya que estas consideraciones producirían los mejores resultados posibles, incluyendo altas tasas de recuperación y alta calidad incluso para materiales presentes en bajas cantidades (Sander et al., 2007).

- Evitar que el panel fotovoltaico sufra más daños durante las fases de desmontaje, recogida y transporte.
- En función de la viabilidad económica, recuperar la mayor cantidad posible de materiales valiosos (por ejemplo, plata, cobre, silicio, vidrio, aluminio), escasos (por ejemplo, indio, telurio) y más peligrosos (por ejemplo, cadmio, plomo, selenio).
- Utilizar un etiquetado duradero que ayude a identificar el producto.
- Vincular a la etiqueta las composiciones de los materiales relevantes para los procesos de reciclaje y recuperación.
- Creación de diseños de paneles que favorezcan el reciclaje.

Dado que en la actualidad sólo existen cantidades moderadas de residuos fotovoltaicos en el mercado mundial de residuos, no hay cantidades suficientes ni incentivos económicos para crear plantas de reciclaje de paneles fotovoltaicos específicas. Por tanto, los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil suelen procesarse en las plantas de reciclaje generales existentes.

a largo plazo, **la construcción de plantas de reciclaje de paneles fotovoltaicos** podría aumentar la capacidad de tratamiento y maximizar los ingresos gracias a una mejor calidad de la producción. Además, podría aumentar la recuperación de componentes valiosos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

3.4.1. Reciclaje de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino

Los principales componentes de los paneles de c-Si, como el vidrio aluminio y cobre, pueden recuperarse con **rendimientos acumulados superior al 85%** de la masa del panel mediante una separación puramente mecánica. Sin embargo, sin una combinación de pasos térmicos, químicos o metalúrgicos, los niveles de impurezas de los materiales recuperados podrían ser lo suficientemente altos para reducir los precios de reventa (Pennington et al., 2016).

La buena separación de los principales componentes, como vidrio laminado, marcos metálicos, cableado y polímeros es el primer paso en los procesos de reciclaje actuales y de primera generación.

3.4.1.1. Reciclaje del vidrio laminado

El reciclaje del vidrio laminado de los paneles c-Si es un proceso relativamente barato que las empresas de reciclaje de vidrio plano pueden aplicar con poca inversión adicional. El proceso suele realizarse por lotes para permitir el ajuste de los parámetros y tener en cuenta las modestas cantidades disponibles para su procesamiento en la actualidad. El equipo típico para eliminar las impurezas, como los residuos de polímero (cola) o los tornillos, del casco de vidrio incluye imanes, trituradoras, tamices, dispositivos de corrientes parásitas, clasificadores ópticos, clasificadores inductivos y sistemas de escape. La fracción de vidrio triturado resultante, que puede estar aún contaminada con silicio, polímeros y metales, puede mezclarse con otro vidrio reciclado como material aislante térmico en las industrias de espuma de vidrio o de fibra de vidrio, la **figura 13** enseña el proceso de reciclaje del vidrio laminado.

Figura 15.

Proceso de reciclaje de vidrio laminado



Nota. La figura representa el reciclaje del vidrio laminado. Tomado de: IRENA & IEA-PVPS (2016).

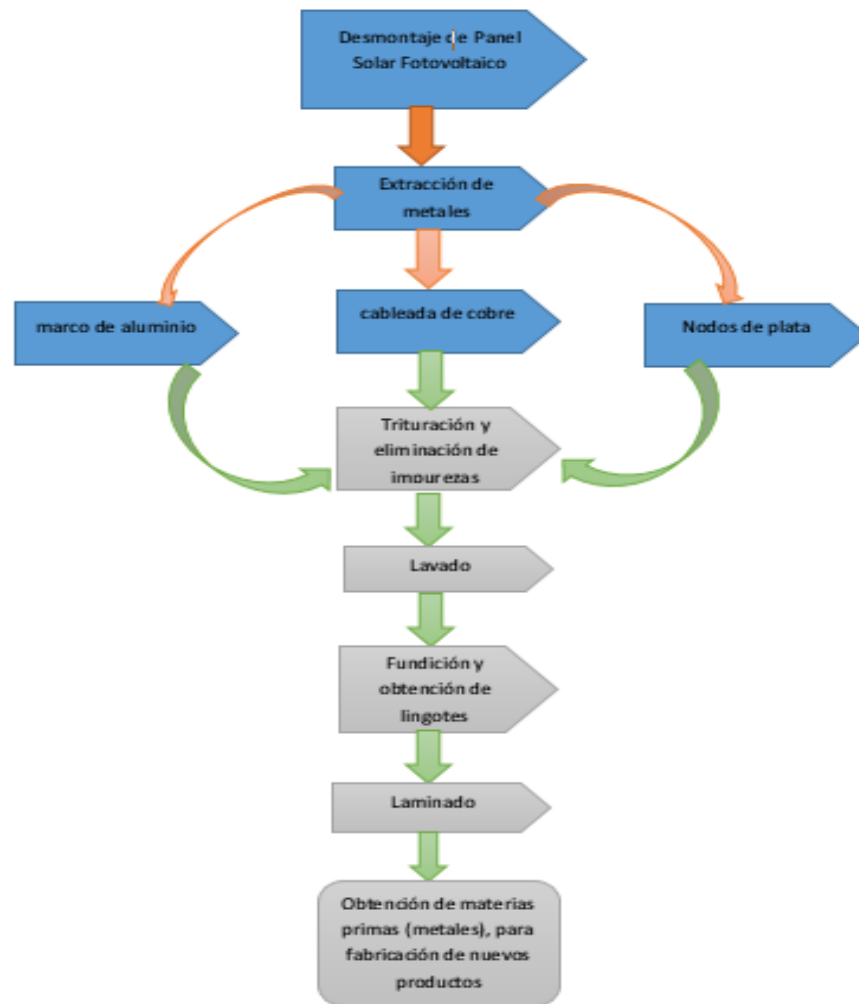
3.4.1.2. Reciclaje de Metales Valiosos

El aluminio o el acero de los bastidores, y el cobre de los cables pueden pasar a formar parte de los metales de reciclaje y, por lo tanto, tienen fácil potencial de reciclaje.

La mayor parte de los metales que existen pueden fundirse y volver a procesarse creando nuevos metales, la **figura 14** ilustra el proceso de recuperación de los metales. Metales como aluminio, plomo, hierro, acero, cobre, plata y oro son reciclados fácilmente cuando no están mezclados con otras sustancias, porque pueden ser fundidos y cambiar de forma o adoptar la misma anterior (Redcicla, 2012).

Figura 16.

Proceso de Recuperación de Metales presente en los Paneles Solares Fotovoltaicos



Nota. La figura representa el diagrama de flujo de recuperación de metales en proceso de reciclaje, adaptado de GBP Metal Group innovación en el reciclaje sostenible, <http://gbpmetalgroup.com/proceso-de-reciclaje/>.

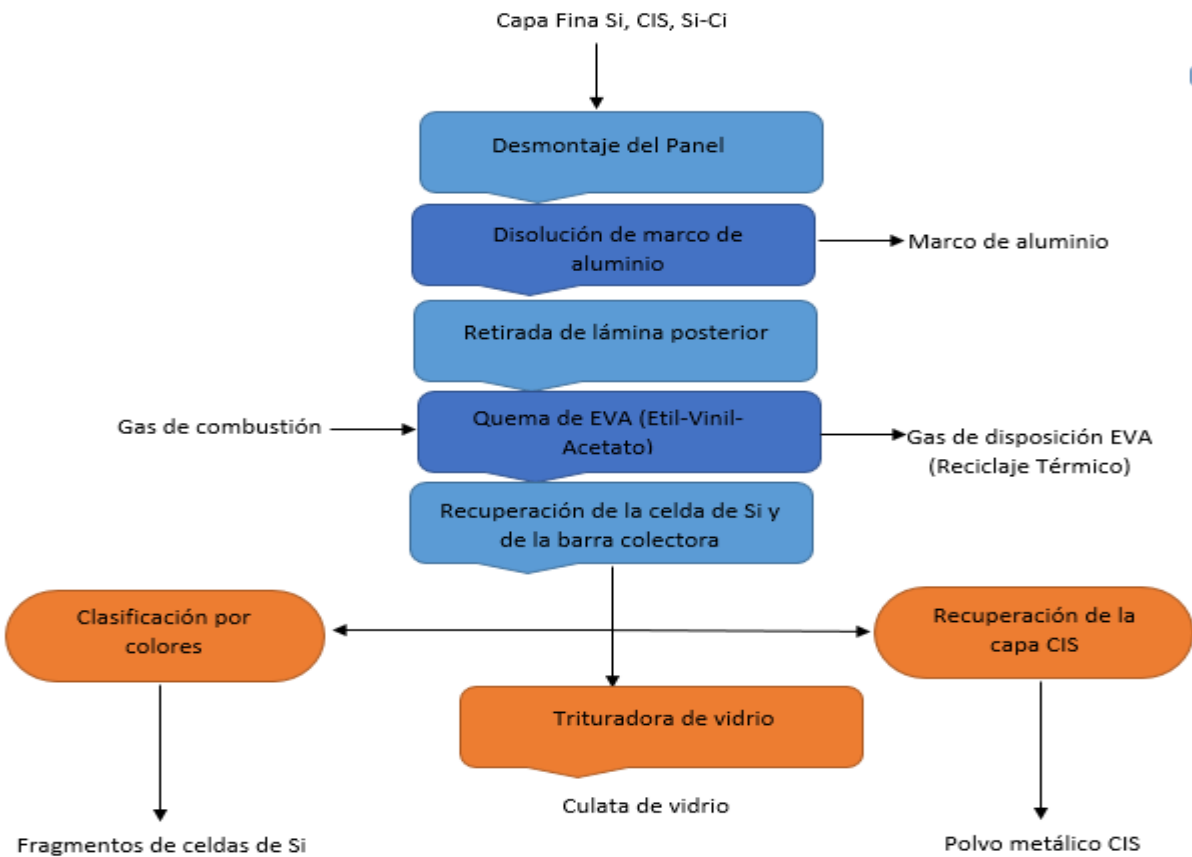
3.4.1.3. Tratamiento de Polímeros Encapsulante

La recuperación de pequeñas cantidades de materiales valiosos (por ejemplo, plata cobre), escasas (por ejemplo, indio, telurio), o la mayoría de los materiales peligrosos (por ejemplo, cadmio, plomo, selenio) como componentes podrían requerir procesos adicionales y más avanzados. Estos se encuentran predominantemente en las fracciones de vidrio y encapsulante (polímero).

Las fracciones de polímero pueden procesarse parcialmente en plantas de conversión de residuos en energía siempre que cumplan las especificaciones de entrada de las plantas.

El programa japonés NEDO de la FAIS se basa en la pirólisis de los polímeros en un horno transportador para la separación de paneles solares, la **figura 15** presenta gráficamente la eliminación de las capas de metalización (marcos de aluminio y lamina posterior) y dopantes de la celda solar en varios grabados selectivo y fundiendo un nuevo lingote de silicio a partir del silicio obtenido, recuperando del material semiconductor (Si o CIS) y el de vidrio (Komoto, 2014).

Figura 17.
Plan de reciclaje propuesto por NEDO/FAIS



Nota. La figura representa el plan de reciclaje de NEDO/FAIS Japón, una forma alternativa de recuperar materiales como lo es la sílice, el vidrio y el aluminio, y tratamiento de disposición del polímero EVA. Tomado de: IRENA (2016).

3.4.2. Reciclaje de paneles fotovoltaicos de capa fina (CIGS y CdTe)

Actualmente, los paneles de película fina se procesan y reciclan utilizando una combinación de tratamientos mecánicos y químicos.

El reciclaje a gran escala de paneles fotovoltaicos de capa fina está aún en sus primeras etapas y mejorará a medida que aumenten los volúmenes de residuos y los correspondientes conocimientos sobre el tratamiento de los mismos (IRENA, 2016).

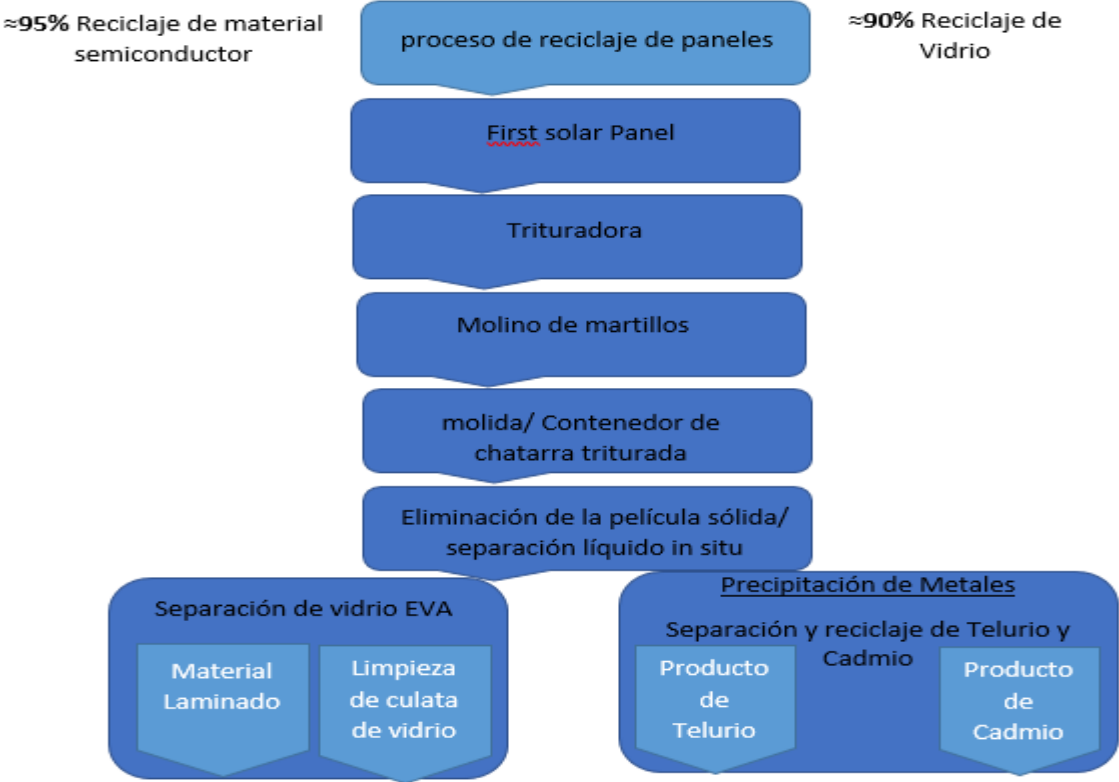
Un ejemplo destacado de este proceso incluye los siguientes pasos que pueden lograr una recuperación de cerca del 90% del vidrio y de cerca del 95% del material semiconductor en masa (Sinha y Cossette, 2012):

1. Los paneles se desmenuzan y se trituran en un molino de martillos hasta obtener partículas de unos 5 milímetros para romper la unión de la laminación. A continuación, el polvo se recoge en un sistema de aspiración equipado con un filtro de filtro de aire de partículas.
2. El grabado de la capa semiconductor se realiza con una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno. El vidrio y los trozos más grandes de etilvinilacetato se separan en un clasificador y en una criba vibratoria. Por último, el vidrio se aclara con agua y se seca en una unidad de filtro de cinta.
3. Los líquidos de filtración con los metales pueden ser extraerse mediante intercambiadores de iones o precipitarse. El cadmio y el telurio pueden ser purificados por terceros para su reutilización en la industria solar.

Este proceso de reciclaje de paneles de película fina, es aplicado en tratamientos de la empresa First solar, la cual se dedica a la fabricación de paneles solares fotovoltaicos de capa fina y ofrece soluciones integrales para sistemas fotovoltaicos y se presenta gráficamente en la **figura 16**.

Figura 18.

Proceso de reciclaje de paneles de película fina



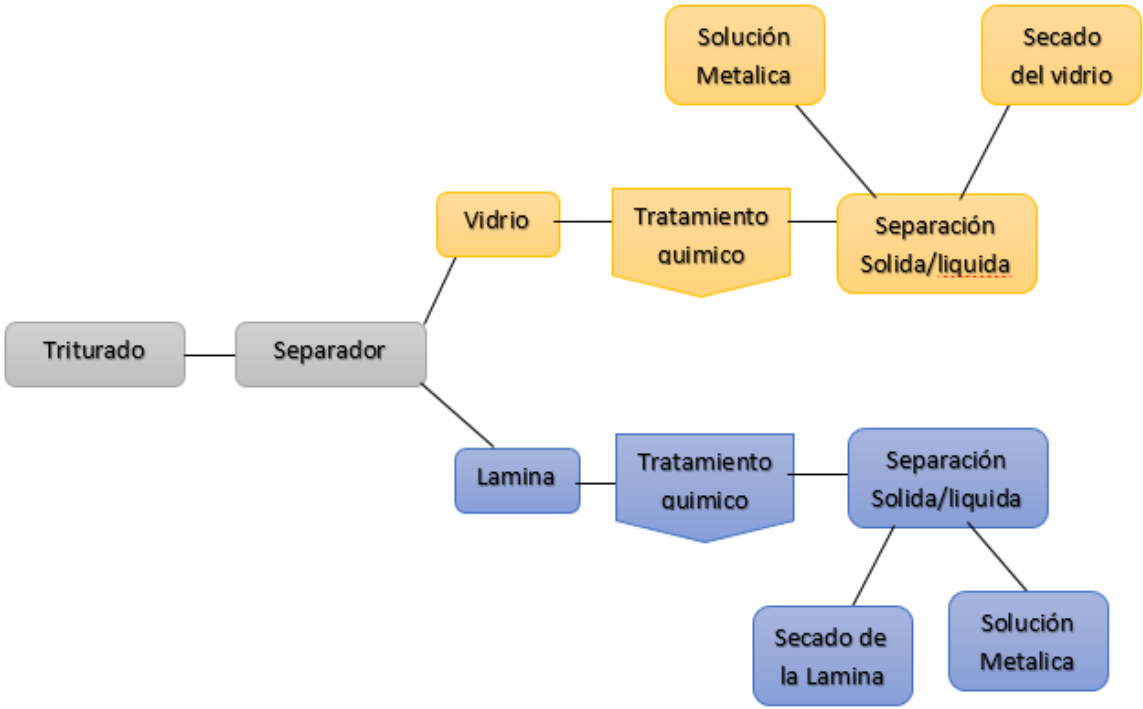
Nota. La figura representa el plan de reciclaje de First Solar, para paneles de película fina, la separación y el refinado de cadmio y telurio son realizados por un tercero. Tomado de: IRENA,2016.

Actualmente existe procesos innovadores de tratamientos para paneles solares de película fina, tal es el caso de Loser Chemie, como puede verse en la **figura 17** quien ha desarrollado y patentado nuevos procesos para enriquecer los metales semiconductores compuestos o la plata de las celdas solares a través de un tratamiento químico después de que los paneles sean pretriturados (Palitzsch y Loser, 2014).

La metalización del aluminio puede utilizarse posteriormente para producir productos químicos de tratamiento de aguas residuales (óxidos de aluminio).

Figura 19.

Proceso de reciclaje Loser Chemie



Nota. La figura representa el plan de reciclaje de Loser Chemie, para paneles de película fina, enriquecimiento de metales semiconductores. Tomado de: IRENA (2016).

4. PROPOUESTA DE ALTERNATIVAS VIABLES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS EN COLOMBIA.

A nivel mundial se tiene que la normatividad se basa en la implementación de programas pos consumo que involucren los productores, comercializadores y consumidores de tal forma que se puedan establecer una participación de todos los integrantes del ciclo de vida de los paneles solares fotovoltaicos, donde en dichos programas se plantea en una disposición de residuos de carácter especial dado su origen y su variación de compuestos, la cual esta demarcada como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, donde lo que se busca que estos residuos sólidos se les dé un manejo distinto al que normalmente se les da a los residuos solido convencionales, y así evitar que lleguen a los rellenos sanitarios y plantas de aprovechamiento donde se podrían mezclar con residuos orgánicos, e inorgánicos lo que generaría un aumento en el potencial toxicológico de los residuos. (Chaparro, 2019).

4.1. Directiva RAEE

Según la Comisión Europea (2013) el equilibrio entre las ventajas y desventajas de los diferentes enfoques para abordar la gestión de los residuos electrónicos, incluidos los residuos de paneles fotovoltaicos, es el núcleo del marco normativo de la UE establecido a través de la Directiva RAEE.

Este marco aborda eficazmente la compleja corriente de residuos de AEE en los 28 Estados miembros de la UE y en el espacio económico más amplio, situando el **principio de responsabilidad ampliada del productor** en su centro.

La directiva tiene un impacto global, ya que los productores que quieren comercializar sus productos en el mercado de la UE son legalmente responsables de la gestión del fin de vida, independientemente de dónde se encuentren sus centros de fabricación (IRENA, 2016).

Esta combinación de responsabilidad legal del productor por el fin de la vida útil del producto, objetivos de recogida, recuperación y reciclaje de AEE y requisitos mínimos de tratamiento que garanticen la protección del medio ambiente y la salud humana puede ser un punto de referencia para el desarrollo de la normativa de gestión de residuos fotovoltaicos a nivel mundial.

Dado que la Directiva revisada sobre RAEE se basa en el principio de responsabilidad ampliada del productor, los productores son responsables de los costes de recogida, tratamiento y control (Comisión Europea, 2015) y estos deben cumplir una serie de requisitos y responsabilidades:

- **Responsabilidad de la financiación.** Los productores son responsables, mediante una garantía financiera, de cubrir los costes de recogida y reciclaje de los productos susceptibles de ser utilizados por los hogares. Son responsables de financiar los puntos de recogida públicos y las instalaciones de tratamiento de primer nivel. También deben adherirse a un sistema de cumplimiento colectivo o pueden desarrollar un sistema individual.
- **Responsabilidad de informar.** Los productores están obligados a informar mensual o anualmente sobre los paneles vendidos, recuperados (a través de sistemas de cumplimiento individuales o colectivos) y enviados para su tratamiento. Dentro de este sistema de información, los productores también deben presentar los resultados del tratamiento de los residuos de los productos (toneladas tratadas, toneladas recuperadas, toneladas recicladas, toneladas eliminadas por fracción, por ejemplo, vidrio, residuos plásticos mixtos, metales).
- **Responsabilidad de la información.** Los productores son responsables de etiquetar los paneles en cumplimiento con la Directiva RAEE. Deben informar a los compradores que los paneles deben eliminarse en instalaciones de recogida específicas y que no deben mezclarse con los residuos generales, y que la recogida y el y el reciclaje son gratuitos (Parlamento Europeo, 2008). También son responsables de informar al comprador de los procedimientos de fin de vida de sus paneles fotovoltaicos. Los sistemas de recogida específicos pueden ir más allá de los requisitos legales, ya que el productor ofrezca la recogida en la puerta de casa, por ejemplo. Por último, los productores están obligados a informar a las empresas de tratamiento de residuos sobre cómo de los paneles fotovoltaicos durante su recogida, almacenamiento,

desmontaje y tratamiento, desmantelamiento y tratamiento. Esta información contiene detalles sobre el contenido de materiales peligrosos y los posibles riesgos laborales. En el caso de los paneles fotovoltaicos, esto incluye información sobre riesgos de electrocución al manipular paneles expuestos a la luz.

4.1.1. Enfoques Internacionales de Gestión de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos

La disposición de paneles solares fotovoltaicos se tiene en muchos países ya como parte de la disposición de RAEE a partir de los conceptos de desarrollo sostenible y del manejo del ciclo de vida, sin embargo el liderazgo por una buena gestión de residuos más allá de un trato especial de separación y disposición en celdas especiales de almacenamiento está dada por los países de la Unión Europea, quienes plantean que se debe lograr una línea de reciclaje, recuperación y reincorporación de los materiales primas basadas en un indicadores y metas a partir de las unidades fabricadas y comercializadas cuya estrategia de disposición está promovida por sus fabricantes.

En relación a países como Estados Unidos si bien también se maneja como un residuo RAEE se tiene como denominado como residuo con potencial peligroso dado sus componentes, sin embargo se da que por iniciativa de los mismos fabricantes se plantea plantas de aprovechamiento y recuperación de materiales bajo estándares de protección y manejo ambiental para residuos potencialmente peligrosos; y por último en casos como Japón y China , donde el consumo de paneles es muy alto se empiezan a plantear e investigar programas de reciclaje a bajo costo. (Chaparro, 2019).

4.2. Enfoque Colombiano de Gestión de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos

Colombia cuenta con la Política de Gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE del 2007, las cuales se ratifican con su inclusión en el decreto 1076 de 2015 conocido como el Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y su complementación con el decreto 284 del 2018 del ministerio de ambiente (Chaparro, 2019).

En el 2013, el Congreso de la República promulgó la Ley 1672 del 19 de julio de 2013 “por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones”.

Esta ley establece la *responsabilidad extendida del productor* como principio rector de la política y asigna obligaciones y responsabilidades a todos los actores de la cadena como los fabricantes e importadores, los comercializadores, los consumidores, y los gestores de RAEE. Así mismo, establece obligaciones a las diferentes entidades que conforman el Gobierno nacional y a las autoridades ambientales y las entidades territoriales (Política Nacional Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE, 2013).

La ley también estipula que los RAEE son residuos de manejo diferenciado y prohíbe su disposición final en rellenos sanitarios, para que sean recolectados y gestionados por los productores y para priorizar su aprovechamiento mediante empresas gestoras que cuenten con licencia ambiental para ello (Política Nacional Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE, 2013).

Sin embargo, la normatividad RAEE se queda corta para los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares dado que si bien los contempla por su clasificación de aparatos electrónicos dentro de la política RAEE como se muestra en la **figura 18** esta no los nombra específicamente, apareciendo dentro de la categoría de Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm) pero sin especificación alguna de su disposición final (Política Nacional Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE, 2013).

Por lo cual su disposición final no se lleva del todo como está estipulada, pues aún se siguen presentando problemáticas asociadas a la mala disposición de éstos por parte de los consumidores, productores, comercializadores y centros de recuperación y disposición (gestores) terminado estos residuos en rellenos sanitarios mezclados en muchas ocasiones con residuos domésticos, generando problemas con lixiviados lo que conlleva a una afectación de las poblaciones y ecosistemas especialmente a la parte de fuentes hídricas (Chaparro, 2019).

Figura 20.

Caracterización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE según la Directiva RAEE de 2012

Categorías	AEE considerados en la categoría	Equivalencia con la Directiva 2002
1. Aparatos de intercambio de temperatura	Neveras, congeladores, aparatos que suministran automáticamente productos fríos, aparatos de aire acondicionado, equipos de deshumidificación, bombas de calor, radiadores de aceite y otros aparatos de intercambio de temperatura que utilicen fluidos diferentes al agua.	Grandes electrodomésticos (únicamente de refrigeración y calefacción).
2. Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm ²	Pantallas, televisores, marcos digitales para fotos con tecnología LCD, monitores, computadores portátiles, incluidos los de tipo <i>notebook</i> y tabletas.	Equipos de informática y telecomunicaciones (únicamente equipos de informática con pantallas de tamaño superior a 100 cm ²).
3. Lámparas	Lámparas fluorescentes rectas, fluorescentes compactas y fluorescentes; lámparas de descarga de alta intensidad, incluidas las de sodio de presión y las de haluros metálicos; lámparas de sodio de baja presión y lámparas LED.	Aparatos de alumbrado excepto las luminarias.
4. Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas, cocinas y hornos eléctricos, hornillos eléctricos, placas de calor eléctricas, luminarias; aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música (excepto los órganos de tubo instalados en iglesias), máquinas de hacer punto y tejer, grandes ordenadores, grandes impresoras, copiadoras, grandes máquinas tragamonedas, productos sanitarios de grandes dimensiones, grandes instrumentos de vigilancia y control, grandes aparatos que suministran productos y dinero automáticamente, paneles fotovoltaicos.	Grandes equipos (con una dimensión exterior superior a 50 cm) de todas las categorías excepto los equipos de refrigeración y calefacción y las lámparas.

Nota. La figura representa la caracterización de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en la UE según la Directiva RAEE de 2012. Tomado de: RAEE, 2013.

4.3. Colombia y sus futuros proyectos energéticos implementando paneles solares fotovoltaicos.

A partir de la apertura de la matriz energética Colombiana y de la incorporación de la energía fotovoltaica en el año 2014, se dispuso por parte de la autoridades ambientales que para estos proyectos de gran generación de energía se tenga que solicitar permisos y estudios ambientales fundamentados bajo los parámetros de las licencias ambientales, los cuales serán evaluados y expedido por parte de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA y en donde se les solicite entre otras cosas, un estudio de impactos ambientales bajo los términos de referencia ya establecidos por el ANLA (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

El gobierno de Colombia ha puesto foco en una política energética que esté en el centro de la recuperación económica y social. Por ello, su propuesta está dirigida principalmente hacia fuentes de generación de energía más limpia, entre ellas la fotovoltaica y a aprovechar los recursos de la nación para impulsar desarrollo sostenible (Towers, 2020)

Actualmente se han presentado diferentes propuestas para la construcción y/o operación de proyectos de generación de energía fotovoltaica que alcanzan una capacidad de 7.515,18 MW en año de entrada en operación que se presentan en las **Tablas 1 y 2**.

Tabla 1.

Proyectos de generación fotovoltaicas con una capacidad de 950,00 MW en etapa de prefactibilidad

Proyecto	Departamento	Capacidad	Año
El Altillo 1	Meta	150,00 MW	2021
Copey Del Verano Solar	Cesar	100,00 MW	2021
Fundación Del Verano Solar	Magdalena	100,00 MW	2021
Parque Fotovoltaico Canoas	Cundinamarca	200,00 MW	2020
Planta Fotovoltaica Carare	Santander	200,00 MW	2024
Proyecto Fotonorte	Norte de Santander	100,00 MW	2023
Proyecto Parque Solar PV Compostela	Antioquia	100,00 MW	2022

Nota. Esta tabla muestra los proyectos en fase 1 de desarrollo. Tomado de: Towers (2020). <https://www.willistowerswatson.com/es-CO/Insights/2020/12/proyectos-de-energia-solar-en-colombia>.

Tabla 2.

Proyectos de generación fotovoltaicas con una capacidad de 6.365,18 MW en etapa de factibilidad

Proyecto	Departamento	Capacidad	Año
Solar Puerto De Oro	Cundinamarca	300,00 MW	2021
Sebastosol	Santander	700,00 MW	2022
Parque Solar Cuestecitas	La Guajira	600,00 MW	2024

Tabla 2.

(Continuación)

Parque Solar Fotovoltaico Gauyepo	Atlántico	200,00 MW	2023
Solar Puerta de Oro	Cundinamarca	300,00 MW	2021
SC Solar San Martin	Cesar	240,00 MW	2022
Parque de Generación de Energía Fotovoltaica Altamira	Huila	200,13 MW	2021
La Orquídea	Bolívar	200,00 MW	2022
La Sierra Solar	Antioquia	200,00 MW	2021
Parque de Generación Fotovoltaica Santa Teresa	La Guajira	200,00 MW	2021
Parque Fotovoltaico Valle Negro	Córdoba	200,00 MW	2021
Parque Solar Fotovoltaico El Copey	Cesar	200,00 MW	2024
Parque Solar Fotovoltaico Guayacanes	Boyacá	200,00 MW	2020
Parque Solar Fotovoltaico Perales	Norte de Santander	200,00 MW	2022
Parque Eólico María	La Guajira	200,00 MW	2021

Nota. La tabla muestra los proyectos en fase 2 de desarrollo con 200,00 o más MW de potencia. Tomado de: Towers Watson (2020). <https://www.willistowerswatson.com/es-CO/Insights/2020/12/proyectos-de-energia-solar-en-colombia>.

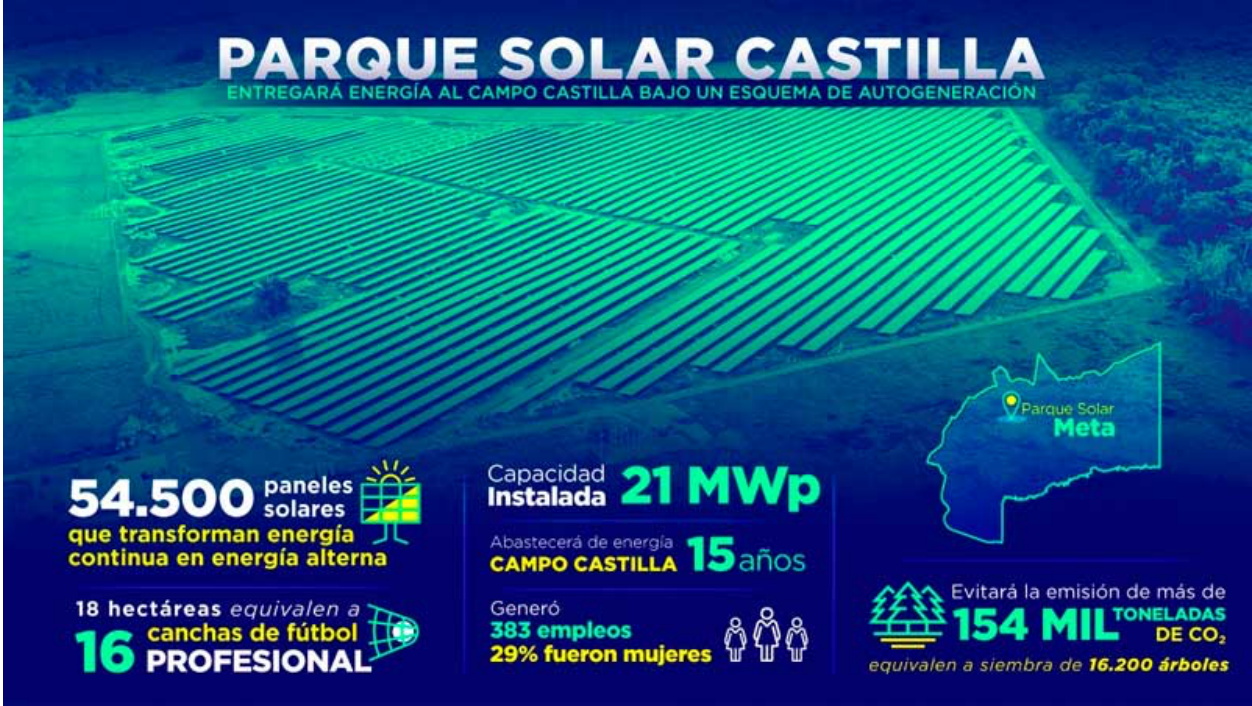
La transición energética que vive el mundo actualmente y Colombia en especial ha dado paso para que empresas del sector hidrocarburos como lo es Ecopetrol S.A, caminen hacia esta transición energética en épocas de crisis con la construcción y operación del nuevo parque solar Castilla La Nueva en el año 2019 en el departamento del Meta.

Este parque solar fue construido por AES Colombia por solicitud de Ecopetrol bajo un contrato de suministro de energía por 15 años, que incluye su operación y mantenimiento. La inversión fue cercana a los US\$20 millones. El parque tiene una potencia instalada de 21 megavatios (MWp), equivalente a la capacidad para energizar una ciudad de 27.000 habitantes como lo muestra la **figura 19**.

Servirá para abastecer parte de la energía que requiere el campo Castilla, el segundo más grande de Colombia con una producción cercana a los 115 mil barriles de petróleo por día (Ecopetrol, 2019).

Figura 21.

Parque Solar Castilla



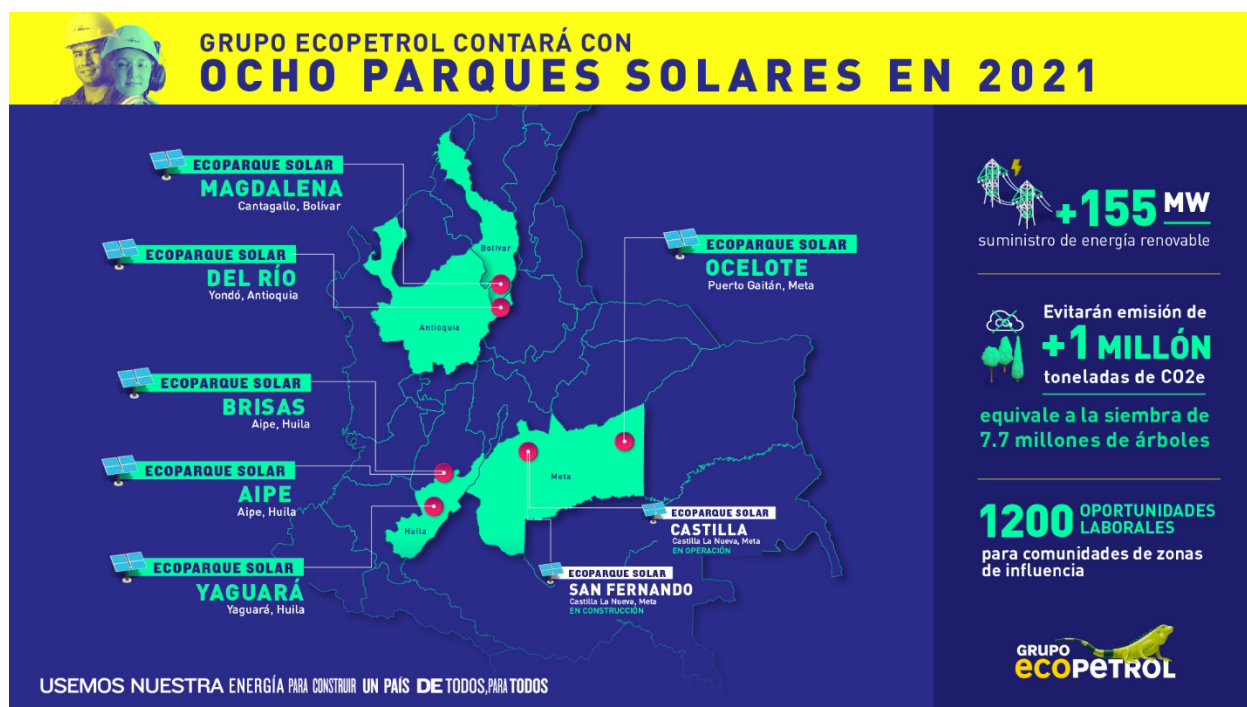
Nota. La figura muestra la presentación del Parque Solar Castilla. Tomado de: Ecopetrol (2019). <https://cutt.ly/jWJyhQ0>

Para el año 2021 el Grupo Ecopetrol contará con ocho (8) parques solares, con estos nuevos parques, el suministro de energía renovable para el Grupo Ecopetrol alcanzará 155 Megavatios (MW) en menos de 2 años (Ecopetrol, 2019).

Estos parques solares estarán ubicados en los departamentos del Meta, Huila, Antioquia y Bolívar además se inauguran la Estación Castilla 3 con inversiones de \$1,3 billones. Trabajaron 1.700 personas como se indica en la **figura 22**.

Figura 22.

Anuncio de nuevos Parques Solares del Grupo Ecopetrol en el 2021



Nota. La figura representa el anuncio de los nuevos parques de generación de energía solar fotovoltaica del Grupo Ecopetrol 2021. Tomado de: Ecopetrol. <https://cutt.ly/jWJyhQ0>

4.4. Alternativas Viables Para el Aprovechamiento de Residuos de Paneles Solares Fotovoltaicos Generados al Final de Su Vida Útil.

4.4.1. Suministro de Material a Través del Desbloqueo de Materias Primas y Sus Beneficios Económicos

Dado que los volúmenes estimados de residuos de paneles fotovoltaicos aumentarán de forma constante en los próximos años se puede crear un importante valor extrayendo la materia prima

secundaria de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil y haciéndola disponible de nuevo en el mercado. Al tener una vida media de 30 años, los paneles fotovoltaicos acumulan una gran cantidad de materias primas incorporadas a los productos que no estarán disponibles para su recuperación durante un periodo de tiempo considerable. Por ejemplo, no se espera un gran flujo de plata procedente del reciclaje de paneles hasta 2025 (IRENA 2016).

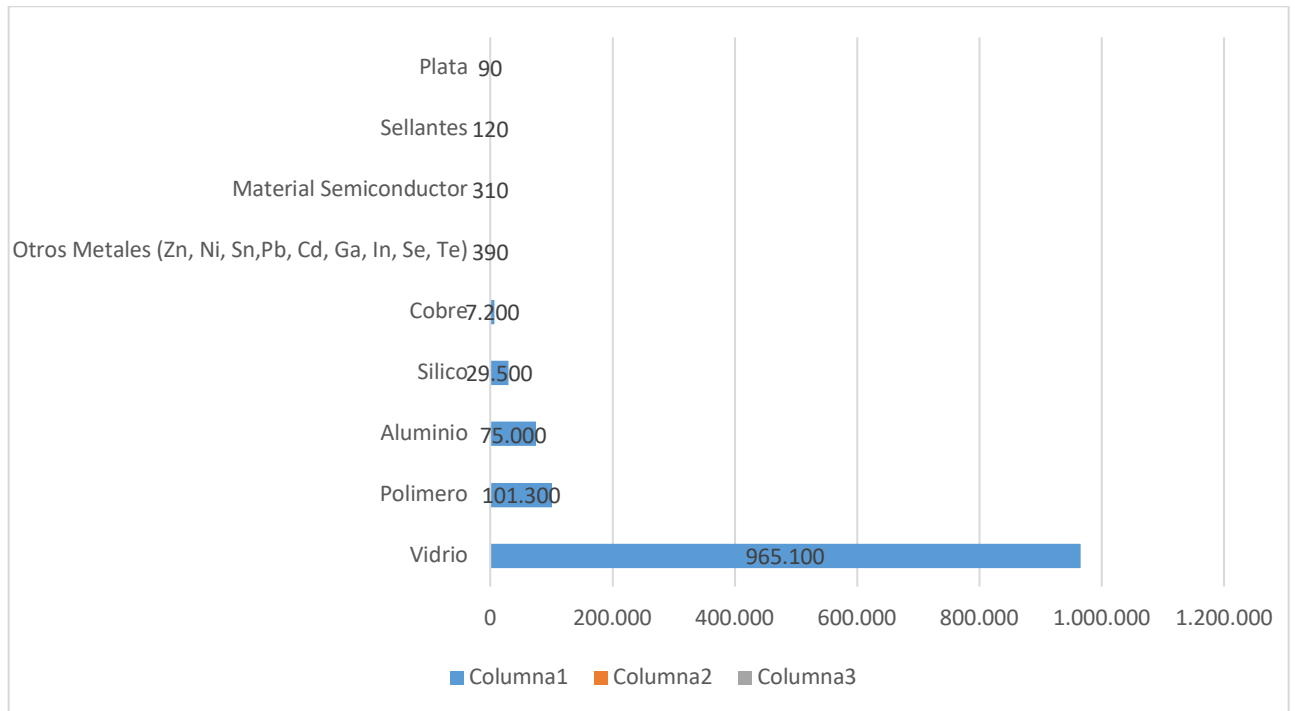
De acuerdo con IRENA (2016), Las materias primas pueden ser tratadas y recicladas a un 65%-70% en masa. Estas tasas de recuperación ya son alcanzables hoy en día y están en línea con la única normativa existente para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, la Directiva RAEE de la UE, las cuales suponen una tasa de recogida del 85% del flujo total de residuos fotovoltaicos al final de su vida útil, así como tecnologías de tratamiento y reciclaje de alto valor disponibles para recuperar la mayoría de las fracciones de material.

Estas estimaciones son basadas en las proporciones previstas de la tecnología de las celdas fotovoltaicas y la composición de los residuos correspondientes multiplicados por el volumen acumulado de residuos de 1,7 millones de Ton para 2030 en el escenario de pérdidas regulares, al igual que el valor monetario el cual es basado en los precios de mercado de abril de 2016 (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016) y estos pueden variar en el futuro debido a las posibles fluctuaciones de los precios en el mercado de las materias primas y a cambios en la composición de las materias primas de los paneles fotovoltaicos (IRENA 2016).

Según IRENA (2016) valor total potencial de los materiales recuperados mediante el tratamiento y el reciclaje de los paneles fotovoltaicos asciende a 450 millones de dólares para 2030. Esto equivale al valor actual de la materia prima necesaria para producir 60 millones de paneles nuevos o 18 GW. En comparación, en 2015 se produjeron 180 millones de paneles nuevos la **figura 23** representa los resultados de las posibles materias primas acumuladas recuperadas para 2030.

Figura 23.

Posibles Materias Primas Acumuladas y Recuperadas para el año 2030



Nota. La figura representa el potencial de recuperación de residuos de paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil panorama para el año 2030. Tomado de: IRENA, 2016.

- **Vidrio:** Debido a que más del 80% del peso de los paneles fabricados con cualquier tecnología fotovoltaica es vidrio; se estimada un aproximado de 960.000 toneladas para 2030, por lo tanto, la mayor masa de material de reciclaje proviene del vidrio. De ahí la importancia en el desarrollo de tecnologías de reciclaje eficientes para el vidrio de los paneles fotovoltaicos. Este tiene un precio medio de mercado de material secundario de 30-50 USD/Ton, dependiendo de la calidad de la recuperación (Estadísticas de Eurostat, 2014), el valor potencial de recuperación supera los 28 millones de USD (IRENA,2016).
- **Aluminio y Cobre:** Aproximadamente de aluminio 75.000 toneladas y 7.000 toneladas de cobre se reintroducirán en el mercado de materiales secundarios a través del tratamiento de los paneles fotovoltaicos. Ambos pueden reciclarse fácilmente utilizando la infraestructura madura disponible hoy en día. Su valor combinado actual es de hasta 140 millones de dólares (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016).

- **Silicio:** “El uso de materiales para las celdas de silicio se ha reducido significativamente durante los últimos diez años, de unos 16 gramos/Wp a menos de 4 gramos/Wp debido al aumento de la eficiencia y a las capas más finas de silicio cristalino que siguen dominando el mercado fotovoltaico” (IRENA, 2016, p.86). Esto significa que, hasta 30.000 toneladas de silicio, pueden recuperarse potencialmente en 2030, asumiendo bajas pérdidas de rendimiento. Esto equivale a la cantidad de silicio necesaria para producir más de 45 millones de paneles nuevos o unos 380 millones de dólares (utilizando precios actuales del polisilicio a 20 USD/kg y una tasa de valor del 70%).
- **Plata:** “La plata recuperada de los paneles fotovoltaicos también tiene un importante valor potencial. Sobre la base de una estimación de 90 toneladas recuperadas en 2030 y a un precio de mercado (abril de 2016) (Europäischer Wirtschaftsdienst, 2016), el valor de la plata recuperada se estima en 50 millones de dólares. Esto es suficiente para producir 50 millones de nuevos paneles” (IRENA, 2016, p.86).
- **Otros Materiales:** La masa potencialmente recuperable es de 390 toneladas entre ellos se encuentran el zinc, el níquel, el galio, el indio, el selenio y el telurio, entre otros. En comparación, la producción mundial de estas materias primas ascendió a 3.000 millones de toneladas en 2015 (IRENA, 2016), lo cual equivale a unos 180 millones de dólares. Con esta cantidad de material se pueden fabricar hasta 60 millones de nuevos paneles fotovoltaicos, suponiendo un uso cada vez más eficiente de materiales raros en los procesos de fabricación, así como una mejor recuperación de la pureza en los tratamientos de reciclaje.
- **Material Semiconductor:** Su cantidad de material recuperado por año 2030 es posiblemente bajo, estimando una cifra de 310 toneladas en comparación con los otros materiales que componen la celda fotovoltaica, sin embargo, esta cantidad podría utilizarse para la producción de 40 millones de nuevos paneles fotovoltaicos (IRENA, 2016).

- **Los sellantes y los polímeros:** “Son difíciles de recuperar en la actualidad. Se necesitan nuevos procesos de tratamiento y reciclaje de tratamiento y el reciclaje para crear valor para más de 100.000 toneladas de estos materiales y sustancias potencialmente recuperables para 2030” (IRENA, 2016, p.86).

4.4.2. Creación de Nuevas Industrias y Empleos Basados en el Sector Fotovoltaico

“El sector de la gestión de residuos en general incluye diferentes partes interesadas, como productores, importadores distribuidores, operadores de sistemas, servicios públicos, municipios gobiernos, empresas de tratamiento de residuos y usuarios finales. La cooperación entre estos actores es necesaria para garantizar la aceptación de los futuros sistemas de gestión de los paneles fotovoltaicos” (IRENA, 2016, p.87).

La gestión de los paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil, tiene el potencial necesario para desarrollar nuevas vías de crecimiento de la industria como lo muestra la **figura 24** y ofrecer oportunidades de empleo para diferentes actores los cuales podrían distribuirse entre el sector público por ejemplo actividades normativas de los gobiernos, trabajos en investigación pública, y el sector privado bajo la referencia de productores, empresas de gestión de residuos, etc.

“La emergente industria del reciclaje fotovoltaico necesitará personal formado con habilidades específicas y conocimientos de procesos de reciclaje. Los programas de educación y de formación específicos deberán formar parte del sector educativo de las energías renovables. Esto proporcionará el conjunto de técnico necesario para que la industria de las energías renovables parte del modelo de las 3R y de la economía circular” (IRENA, 2016, p.87).

Figura 24.

Creación de valor industrial a partir de la gestión fotovoltaica al final de su vida útil



Nota. La figura representa el desarrollo de nuevas vías de crecimiento de la industria fotovoltaica. Tomado de: IRENA, 2016.

Las organizaciones de I+D tendrán un papel importante que desempeñar para lograr una mayor reducción de los materiales aumentar la eficiencia y seguir investigando los mejores procesos de reciclaje y tratamiento de paneles fotovoltaicos, así como los institutos públicos de varios países líderes como lo son Alemania, Japón y China quienes ya han empezado a investigar metodologías de reciclaje con el apoyo de las administraciones locales (IRENA,2016).

Tradicionalmente los productores se han concentrado más en la producción que en el final de la vida útil (reparación/tratamiento y reciclaje debido al importante crecimiento de la industria de las energías renovables, pero el creciente volumen de residuos fotovoltaicos obligara cambiará esta perspectiva y se reorientara la I+D hacia todo el ciclo de vida de un panel esto ocasionara la reducción del coste de los paneles fotovoltaicos como motor principal los para que los productores centren sus capacidades de investigación de alta tecnología en el aumento de la eficiencia de los materiales y de los paneles en sí (IRENA,2016).

“Lo más importante es que la gestión del final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos desencadenará por sí misma una importante industria de **reciclaje** y tratamiento. Toda la gestión de residuos está regulada por los gobiernos, por lo que conlleva diferentes responsabilidades para las partes interesadas, dependiendo de la legislación” (IRENA, 2016, p.87).

Esta industria de reciclaje producirá que el sector privado de inicio una nueva industria de servicios de reparación y reutilización de paneles fotovoltaicos y es probable que surjan oportunidades de empleo para los propios productores y socios independientes o contratados y de servicios dependientes de los productores (por ejemplo, empresas de instalación y empresas constructoras). Sin embargo, los recolectores de residuos y empresas de pretratamiento también se espera que amplíen su cartera a medida que aumenten las oportunidades de inversión en este sector (IRENA, 2016).

“En la actualidad no existe un mercado formal y establecido de reciclaje de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, las empresas de residuos están estudiando el nuevo caso de negocio para el tratamiento de paneles fotovoltaicos, dado el aumento de la normativa sobre residuos electrónicos y los mercados fotovoltaicos, por consiguiente, en el caso de los residuos de paneles fotovoltaicos, pueden surgir muchas oportunidades en las economías en desarrollo o en transición con sectores informales que dominan los servicios de recogida y servicios de reciclaje. Los productores están activos en muchos de estos países por lo que un sistema obligatorio de residuos fotovoltaicos podría retener más empleo adicional, especialmente en las industrias de reparación/reutilización y reciclaje/tratamiento, lo que mejoraría al mismo tiempo, las prácticas nacionales de gestión de residuos (IRENA, 2016).

6. CONCLUSIONES

- De acuerdo a este trabajo de investigación, podemos concluir que la gestión del final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos desencadenará por sí misma una importante industria de reciclaje y tratamiento, y toda la cadena de gestión de residuos está regulada por los gobiernos, por lo que conlleva diferentes responsabilidades para las partes interesadas, dependiendo de la legislación.
- Colombia por su parte cuenta con una política de manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos(RAEE), pero esta se queda corta al no mencionar explícitamente la incorporación de los paneles solares fotovoltaicos, normatividad que establece que para la puesta en marcha de grandes plantas de producción se debe exigir licencias ambientales donde se notifique al solicitante que realice un estudio de impacto ambiental, el cual contemple acciones al manejo de residuos al final de la vida útil, acciones que se quedan cortan.
- Colombia no tiene empresas gestoras de residuos para el aprovechamiento de paneles solares fotovoltaicos y debido al evidente crecimiento de estas unidades, las celdas de disposición serán ineficientes debido a la cantidad de paneles que se tendrán en un par de años, por esta razón se debe establecer mecanismo a futuro para estos casos, al igual que la evidente falta de programas de post consumo para esta serie de residuos como tal, lo que haría que su manejo adecuado sea más eficiente para los pequeños usuarios.
- De los residuos de paneles fotovoltaicos, pueden surgir muchas oportunidades en las economías en desarrollo o en transición con sectores informales que dominan los servicios de recogida y servicios de reciclaje, para Colombia esto significa una ventada de oportunidades ya que, los productores de paneles solares están activos, por lo que un sistema obligatorio de residuos fotovoltaicos podría retener más empleo adicional, especialmente en las industrias de reparación/reutilización y reciclaje/tratamiento y al mismo tiempo, mejoraría las prácticas nacionales de gestión de residuos.

7. RECOMENDACIONES

- La normatividad RAEE no especifica la disposición final para los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares, esta los contempla por su clasificación de aparatos electrónicos dentro de la política RAEE, pero no los nombra específicamente, siendo recomendable un apartado sobre el manejo adecuado de los paneles solares fotovoltaicos, lo cual evitaría que este tipo de residuos lleguen a los rellenos sanitarios y botaderos, evitando futuros problemas de lixiviados y optimizando su aprovechamiento para la generación de materias primas.
- A partir de la apertura de la matriz energética colombiana y de la incorporación de la energía fotovoltaica en el año 2014, se han impulsado proyectos de generación de energía fotovoltaica que le dan esperanza al país para aumentar su autosuficiencia energética, pero esto también trae consigo oportunidades de empleo en el sector energético y por su puesto en la industria de reciclaje, por lo que se sugiere fomentar la educación sobre los RAEE y en especial las unidades fotovoltaicas, las cuales traerán consigo la pertinencia económica en el uso y aprovechamiento de este tipo de residuos al final de su vida útil.
- Es fundamental estrechar la relación entre las entidades gubernamentales y las organizaciones de I+D, ya que el desarrollo institucional es esencial para apoyar las prácticas sostenibles al final de la vida de la energía fotovoltaica y así lograr una mayor reducción de los materiales aumentar la eficiencia y seguir investigando los mejores procesos de reciclaje y tratamiento de paneles fotovoltaicos, siendo la I + D, la educación y la formación elementos necesarios para apoyar la gestión del final de la vida útil de la energía fotovoltaica para diseñar e implementar sistemas socio-tecnológicos.

BIBLIOGRAFIA

- Bekkelund, K. (2013). Life Cycle Assessment of Thin Film Solar Panels. Livssyklusanalyse av solcellepaneler. (Tesis de Maestría). Norwegian University of science and Technology. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/235329/654872_FULLTEXT01.pdf?sequence=1
- BIO de Deloitte (BIO) , BIPRO , Dirección General de Medio Ambiente (Comisión Europea) , Universidad de las Naciones Unidas (UNU). (2015). Study on WEEE Recovery Targets, preparation for re-use targets and on the method for calculation of the recovery targets. DOI 10.2779 / 235063
- Bonilla, N. (2016). Análisis Del Ciclo De Vida Del Proceso De Recuperación De Un Panel Fotovoltaico De Silicio Policristalino En Costa Rica. (Trabajo de grado). Instituto Tecnológico De Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6539/Analisis_ciclo_vida_proceso.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Calnan, S. (2014). Application of Oxide Coatings in Photovoltaic Devices. *Coatings*. 4, pp. 162-202 www.mdpi.com/2079-6412/4/1/162.
- Calnan, S. (2014). Aplicaciones de recubrimientos de óxido en dispositivos fotovoltaicos. *Coatings*. 4(1), pp. 162-202. www.mdpi.com/2079-6412/4/1/162
- Chaparro Pérez, J. F. (2019). Manejo Integral De Residuos Generados Por Los Paneles Solares Fotovoltaicos En Colombia (Trabajo de Especialización) Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32081/ChaparroPerezJhonFreddy%2C2019.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Decreto 1076 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible] Por medio del cual se expide el Decreto Único. 26 de mayo de 2015.

Decreto 284 de 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se adiciona el Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE Y se dictan otras.

Diaz Briñez, J. C. (2019). Transformación de residuos Sólidos Para la Elaboración de Celdas Fotovoltaicas. (Trabajo de Grado). Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/45450/u827522.pdf?sequence=1>

Doi, T., Tsuda, I., Inagida, H., Murata, A., Sakuta, k. y Kurokawa, K. (2001). Estudio experimental sobre el reciclaje de módulos fotovoltaicos con el método de solventes orgánicos. 67(1-4), pp. 397-403. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00308-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00308-1)

Ecofener (enero de 2019). Tipo de paneles solares. <https://ecofener.com/blog/tipos-de-paneles-solares/>

Ecopetrol (2021). Ecopetrol y AES pusieron en operación Parque Solar Castilla. https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3Apath%3A%2Fecopetrol_wcm_library%2Fas_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-tendra-8-parques-solares-en-2021).

Ecopetrol (2019). Ecopetrol y AES pusieron en operación Parque Solar Castilla. <https://cutt.ly/OE2yrLi>

Erdmann, L., Behrendt, S. and Feil, M. (2011), Kritische Rohstoffe für Deutschland (Critical Raw Materials for Germany). www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf

- Fthenakis, V. (2000). End-of-Life Management and Recycling of PV Modules. *Energy Policy*. 28. pp. 1051-1058. http://www.clca.columbia.edu/papers/End_Life_Management_Recycling_Energy_Policy.pdf
- Giacchetta, G., Leporini, M. and Marchetti B. (2013). Evaluation of the Environmental Benefits of New High Value Process for the Management of the End of Life of Thin-film Photovoltaic Modules. *Journal of Cleaner Production*, 51. pp. 214–24. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.01.022
- Giuliano, G. (2014). De la cuna a la cuna : una crítica al diseño ecoeficiente. *Revista Argentina de Ingeniería*. 3(3). <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/5466/1/cuna-critica-diseno-ecoeiciente.pdf>
- Greening-e Smart Service Solutions. (2020). Técnicas de evaluación de calidad de módulos fotovoltaicos. <https://greening-e.com/tecnicas-de-evaluacion-de-calidad-de-los-modulos-fotovoltaicos/>
- Grupo Ecopetrol. (2021). Portal Ecopetrol Anuncio de los nuevos parques de generación de energía solar fotovoltaica. ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3Apath%3A%2Fecopetrol_wcm_library%2Fas_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2021%2Fgrupo-ecopetrol-tendra-8-parques-solares-en-2021
- International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS). (2016). *End of life management. Solar Photovoltaic Panels*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2016). Informes Nacional De Generación De Residuos o Desechos Peligrosos. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, Gobierno Nacional De Colombia.

- Kang, S., Yoo, S. Lee, J., Boo, B and Ryu, H. (31 de octubre de 2012). Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules [Archivo PDF]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148112002716>
- Kim, Y. and Lee, J. (2012). Dissolution of Ethylene Vinyl Acetate in Crystalline Silicon PV Modules Using Ultrasonic Irradiation and Organic Solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, pp. 317–322, doi: 10.1016/j.solmat.2011.11.022
- Komoto, K. (2014). Developments on PV Recycling in Japan. *Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg.
- Kushiya, K. (2003). Progress in Large-Area Cu (In,Ga) Se₂- Based Thin-Film Modules with the Efficiency of ver 13%. *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka.
- Marini, C. (2014) A Prospective Mapping Of Environmental Impacts Of Large Scale Photovoltaic Ground Mounted Systems. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam.
- Marwede, M. (2013). Cycling Critical Absorber Materials of CdTe- and CIGS-Photovoltaics: Material Efficiency Along the Life-Cycle, Augsburg. opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/files/2440/Thesis_Marwede.pdf (viewed May 2015).
- Marwede, M. and Reller, A. (2012). Future Recycling Flows of Tellurium from Cadmium Telluride Photovoltaic Waste. *Journal Resources, Conservation and Recycling*, 69, pp. 35-49.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. Gobierno Nacional de Colombia. (24 de Febr8ero de 2019). Home Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana Sustancias Químicas y Residuos Peligrosos. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales->

sectorial-y-urbana/sustancias-quimicas-y-residuos peligrosos#informaci%C3%B3n-de-inter%C3%A9s

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2005). Política Ambiental Para La Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. Bogotá, DC. Colombia: Gobierno Nacional de Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS. (2017). Política Nacional de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE. Bogotá, D.C.: Colombia: Gobierno Nacional de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Gestión Integral de los Residuos o desechos peligrosos bases conceptuales. Bogotá, D.C., Colombia: Gobierno de Colombia.

National Renewable Energy Laboratory (2011), Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D, web page, National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov/pv/thinfilm.html (viewed October 2015).

Palitzsch, W. and U. Loser (2014), Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen (Integrated reuse of high-tech and green-tech waste), Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge, pp.173–81, Springer: Berlin, Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39704-2_12 (viewed October 2015).

Pearce, J., et al. (2014), Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules, www.appropedia.org/Producer_responsibility_and_recycling_solar_photovoltaic_modules (viewed October 2014).

Pennington, D., et al. (2016), Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Perez-Santalla, M. (2013), Silver Use: Changes & Outlook, www.bullionvault.com/gold-news/silver-use-103020132 (viewed November 2015).

- Raitel (2014), International Technology Roadmap for Photovoltaic - Results 2013, www.itrpv.net/Reports/Downloads (viewed March 2016).
- Ramaswami, V., et al. (2014), “Issues Concerning Use of Antimony in Solar Glass and Development of Antimonyfree Low Iron Glass for Solar Applications,” Proceedings 29th W. Berger, F. G. Simon, K. Weimann, E. A. Alsema “Un enfoque novedoso para el reciclaje de módulos fotovoltaicos de capa fina”, Recursos, Conservación y Reciclaje, 54, no. 10, pp. 711-718, agos, 2010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.001> [Acceso: agosto, 6, 2021].
- Rodríguez S, (2018). Plan de Manejo Para La Disposición Final de Paneles Solares Energía Andina S.A. (Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero, Ambiental Universidad del Bosque).
- Salamanca S (2017), Propuesta de Diseño de un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica Caso de Aplicación Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas Revista Científica, 30 (3), 263-277 <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/index>.
- Sander, K., et al. (2007), Study On The Development Of A Takeback And Recovery System For Photovoltaic Modules, European Photovoltaic Industry Association, German Solar Industries Association, Berlin.
- Sinha, P. and M. Cossette (2012), “End-of-Life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining,” *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Frankfurt am Main.
- Taoa, C., J. Jiang and M. Taoa (2011), “Natural Resource Limitations to Terawatt Solar Cell Deployment,” ECS Transactions, Vol. 33/17, pp. 3-11, Las Vegas, <http://ecst.ecsdl.org/content/33/17/3.full.pdf> (viewed November 2015).

- T. Y. Wang, et al. (2012), “Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module,” Photovoltaic Specialists Conference, 2012 38th Institute of Electrical and Electronics Engineers, Austin, Texas, pp. 002355-002358, doi: 10.1109/ PVSC.2012.6318071.
- Wambach, K. et al. (2009), “Photovoltaics Recycling Scoping Workshop,” 34th PV Specialists Conference, Philadelphia, www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/3_4_PV-Module-RecyclingWambach.pdf (viewed February 2015).
- Wambach, K., Schlenker, S., Muller, A. and Klenk, M. (2007). The Second Life Of A 300 Kw Pv Generator Manufactured With Recycled Wafers From The Oldest German Pv Power Plant. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2006, Dresden. https://www.researchgate.net/publication/237811934_THE_SECOND_LIFE_OF_A_300_KW_PV_GENERATOR_MANUFACTURED_WITH_RECYCLED_WAFERS_FROM_THE_OLDEST_GERMAN_PV_POWER_PLANT
- Towers, W. (2020). Proyectos de energía solar en Colombia. <https://www.willistowerswatson.com/es-CO/Insights/2020/12/proyectos-de-energia-solar-en-colombia>
- Woodhouse, M., Goodrich, A. and Eggert, R. (2013). Supply-Chain Dynamics of Tellurium, Indium, and Gallium Within the Context of PV Manufacturing Costs. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Photovoltaics*, 99. pp. 1–5. DOI: 10.1109 / JPHOTOV.2013.2242960
- Zimmermann, T. (2013). Dynamic Material Flow Analysis of Critical Metals Embodied in Thin-film Photovoltaic Cells. <https://core.ac.uk/reader/297279540>