

# PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Desarrollo de un protocolo para la adecuada gestión de RAEE procedentes de paneles  
fotovoltaicos en Colombia

Lilian Maritza Silva García

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Fernando Viejo Abrante

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirector

Ana Emilse Coy Echeverría

Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

*A mi madre  
quien con amor y sabiduría supo guiar mis pasos  
por el mejor camino de la vida, hasta permitirme un día caminar sola.*

*Madre, gracias por enseñarme la excelencia,  
gracias por mostrarme que con constancia y disciplina  
se logran todos los retos y proyectos que se escriben en la mente  
pero se fraguan con el corazón.*

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	11
1. Objetivos .....	12
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivos específicos .....	12
2. Estado del Arte.....	13
3. Metodología .....	19
3.1. Fase I: Identificación de los componentes de los paneles solares fotovoltaicos.....	19
3.2. Fase II: Análisis de estrategias existentes para la separación de los componentes .....	19
3.3. Fase III: Aspectos a considerar para la viabilidad de implementación en Colombia .....	19
3.4. Fase IV: Evaluación de los métodos de aprovechamiento y disposición de materiales ...	20
3.5. Fase V: Análisis de las rutas de aprovechamiento.....	20
4. Resultados y Discusión.....	21
4.1. Identificación de los componentes de los paneles solares fotovoltaicos comercializados mayoritariamente en Colombia.....	21
4.2. Estrategias existentes para la separación de los componentes de los paneles solares .....	26
4.3. Aspectos a considerar para la viabilidad de implementación en Colombia.....	31
4.4. Evaluación de los métodos de aprovechamiento y disposición de los materiales .....	35
4.5. Análisis de las rutas de aprovechamiento .....	38
5. Conclusiones .....	41

PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA	4
6. Recomendaciones .....	42
Referencias bibliográficas.....	43
Apéndices.....	53

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Proyectos de generación solar mayores a 10 MW en Colombia .....	22
--	----

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> Estructura y composición del panel solar PV de primera generación .....	24
<b>Figura 2</b> Estrategias de separación de componentes y recuperación de materiales de paneles solares .....	30
<b>Figura 3</b> Aspectos considerados para la aplicabilidad en Colombia .....	34
<b>Figura 4</b> Capacidad instalada en Generación FNCER   Solar Fotovoltaica.....	39
<b>Figura 5</b> Economía circular en el aprovechamiento RAEE paneles solares en Colombia .....	40

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A Normativa Vigente para el tratamiento de los RAEE de Paneles Solares PV en el mundo.....</b>	<b>53</b>
<b>Apéndice B Paneles Solares de Segunda y Tercera Generación.....</b>	<b>61</b>

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Glosario**

**Grado solar:** Pureza de materiales reciclados, aptos para ser reutilizado en la fabricación de nuevos paneles fotovoltaicos.

**RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos):** Residuos generados por aparatos eléctricos y electrónicos al finalizar su vida útil, que requieren un manejo adecuado para minimizar el impacto ambiental.

**Panel Fotovoltaico (FV):** Dispositivo que convierte la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

**Silicio Monocristalino:** Tipo de silicio utilizado en paneles solares que se caracteriza por una estructura cristalina uniforme y mayor eficiencia energética.

**Silicio Policristalino:** Tipo de silicio utilizado en paneles solares compuesto de múltiples cristales, generalmente más económico pero con menor eficiencia que el monocristalino.

**EVA (Etileno-Vinil-Acetato):** Encapsulante utilizado en los paneles solares para proteger las células fotovoltaicas del daño ambiental y mejorar la durabilidad.

**Economía Circular:** Modelo económico que busca la reutilización, reciclaje y aprovechamiento de materiales para minimizar los residuos y el impacto ambiental.

**Obsolescencia Programada:** Estrategia comercial que reduce la vida útil de los productos para fomentar su reemplazo, contribuyendo al aumento de residuos.

**Pirólisis:** Proceso térmico utilizado para descomponer materiales orgánicos como el encapsulante EVA, aplicable al reciclaje de paneles solares.

**Lixiviación:** Técnica química empleada para recuperar metales mediante el uso de disolventes.

**Tasa de Degradación:** Proceso mediante el cual la eficiencia de un panel solar disminuye con el tiempo debido a factores ambientales y técnicos.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Resumen**

**Título:** Desarrollo de un protocolo para la adecuada gestión de RAEE procedentes de paneles fotovoltaicos en Colombia\*

**Autor:** Lilian Maritza Silva García\*\*

**Palabras clave:** panel fotovoltaico, silicio, reciclaje, renovable

**Descripción:**

La transición hacia energías renovables, como los paneles solares fotovoltaicos, es fundamental para combatir el cambio climático. En Colombia, esta tecnología ha crecido, impulsada por políticas gubernamentales. Sin embargo, la gestión adecuada de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) derivados de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, la cual es de aproximadamente 25 años, se presenta como un desafío clave.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un protocolo para la correcta gestión de estos residuos, abordando la identificación de los componentes de los paneles, el análisis de estrategias de reciclaje aplicadas en otros países, así como las implementadas a nivel de investigación y, su viabilidad en el contexto colombiano.

Actualmente, la falta de regulación en Colombia respecto al reciclaje de paneles solares ofrece tanto oportunidades como retos. Se requiere una infraestructura adecuada para el reciclaje y separación de materiales como silicio, aluminio, cobre, plata y plomo, cuya reutilización contribuye a minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>, la minería de extracción y generar una economía circular. A nivel internacional, algunas empresas han logrado tasas de recuperación superiores al 90% de los materiales, pero persisten barreras técnicas, debido a los métodos usados, los cuales en su mayoría son tomados del reciclaje de otros tipos de RAEE.

La implementación de plantas de reciclaje en Colombia, enfocadas en procesos térmicos y químicos, puede ser viable considerando los aspectos técnicos, económicos y de regulación ambiental, así como los desafíos logísticos asociados a la geografía del país. Se sugiere el desarrollo de proyectos piloto para adaptar las mejores prácticas internacionales al contexto local y fomentar una industria de reciclaje sostenible que gestione eficientemente los residuos de los paneles fotovoltaicos.

---

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fernando Viejo. Codirector: Ana Coy

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Abstract**

**Title:** Development of a Protocol for the Proper Management of WEEE from Photovoltaic Panels in Colombia \*

**Author:** Lilian Maritza Silva García\*\*

**Key Words:** Photovoltaic panel, silicon, recycling, renewable

**Description:**

The transition to renewable energy sources, such as photovoltaic solar panels, is essential for combating climate change. In Colombia, this technology has grown, driven by government policies. However, the proper management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) generated by solar panels at the end of their lifespan, which is approximately 25 years, presents a key challenge.

This study aims to develop a protocol for the proper management of these wastes, addressing the identification of panel components, analyzing recycling strategies implemented in other countries, as well as those applied at the research level, and assessing their viability in the Colombian context. Currently, the lack of regulation in Colombia regarding the recycling of solar panels presents both opportunities and challenges. Adequate infrastructure is needed for the recycling and separation of materials such as silicon, aluminum, copper, silver, and lead, whose reuse helps minimize CO<sub>2</sub> emissions, reduces extraction mining, and generates a circular economy. Internationally, some companies have achieved recovery rates exceeding 90% of materials, but technical barriers persist due to the methods used, which are mostly derived from the recycling of other types of WEEE.

The implementation of recycling plants in Colombia, focused on thermal and chemical processes, may be viable considering technical, economic, and environmental regulatory aspects, as well as the logistical challenges associated with the country's geography. The development of pilot projects is suggested to adapt the best international practices to the local context and foster a sustainable recycling industry that efficiently manages the waste from photovoltaic panels.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fernando Viejo. Codirector: Ana Coy

### **Introducción**

La transición hacia energías renovables es una necesidad urgente en la lucha contra el cambio climático y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los paneles solares fotovoltaicos (FV) han emergido como una solución viable y eficiente, contribuyendo significativamente a la generación de energía limpia y sustentable. En Colombia, esta tecnología ha comenzado a expandirse, impulsada por políticas gubernamentales y la creciente conciencia ambiental.

Sin embargo, surge un desafío crucial: la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) procedentes de estos sistemas al final de su vida útil. Los paneles solares tienen una vida útil aproximada de 25 años, y se espera que, después de este periodo, su rendimiento disminuya significativamente. Factores como la degradación de materiales, avances tecnológicos y políticas estatales aceleran el proceso de reemplazo, generando un volumen considerable de residuos que requiere una gestión adecuada.

En Colombia, la falta de una reglamentación específica para el reciclaje y aprovechamiento de estos residuos representa una oportunidad y un desafío. Es esencial desarrollar un protocolo que permita una gestión eficiente y sostenible, asegurando una economía circular que maximice el aprovechamiento de los materiales recuperados y minimice el impacto en el medio ambiente.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar un protocolo para la adecuada gestión y aprovechamiento de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) procedentes de paneles solares fotovoltaicos en Colombia. Este protocolo se basará en la identificación de los componentes de los paneles, el análisis de estrategias de separación y reciclaje empleadas en otros países, y la evaluación de la aplicabilidad de estas metodologías en el contexto colombiano. Además, se explorarán las rutas de aprovechamiento y/o disposición final de los materiales, contribuyendo a una gestión integral y sostenible de los residuos fotovoltaicos.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Desarrollar un protocolo para la adecuada gestión de RAEE procedentes de paneles solares fotovoltaicos aplicable a Colombia.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Identificar los componentes de los que están constituidos los paneles solares fotovoltaicos comercializados mayoritariamente en Colombia.
- Investigar estrategias existentes para la separación de los componentes de paneles solares empleadas en otros países de referencia en el sector.
- Identificar las posibles rutas de aprovechamiento o disposición de los materiales que componen los paneles solares fotovoltaicos.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

### 2. Estado del Arte

Las energías verdes o renovables pasan por sus “días soleados” a causa de varios factores, pero principalmente, por el aumento de CO<sub>2</sub> en el planeta y la necesidad inminente de su reducción; tema al que los gobiernos de todo el mundo ponen sus ojos y dirigen sus políticas cada vez con mayor determinación. Actualmente, la masificación de estas tecnologías hace que cada día sean más eficientes y más asequibles a los consumidores de clases menos favorecidas o con menos ingresos per cápita (Matasci S, 2022). En Estados Unidos, las exenciones arancelarias, la reducción o condonación de hasta un 30% del costo total del proyecto de energía solar por parte del Gobierno, y los buenos programas de financiación ofrecidos por los bancos, mejoran significativamente la tendencia a instalar sistemas fotovoltaicos tanto en granjas solares como en hogares (ResearchGate, 2023). El hecho de que una vivienda tenga instalados paneles solares mejora de manera significativa su atractivo al momento de realizar una compra-venta lo que, además, impulsa la implementación de sistemas fotovoltaicos de manera privada e independiente en los hogares estadounidenses (Solarmente, 2021).

Para el caso de Colombia, el gobierno actual ve de manera favorable esta transición energética, por lo que se está trabajando desde el órgano legislativo y se espera que se adopten y/o adapten políticas similares a las de los Estados Unidos o incluso de la Unión Europea (o una mezcla de las dos).

Como lo reporta el portal “Energías renovables” (Energías Renovables, 2023), actualmente en el mundo se encuentra instalada una capacidad total fotovoltaica (FV) de 239 gigavatios (GW). La eficiencia de los paneles fotovoltaicos depende de diferentes factores como la misma ubicación del panel (hay algunos que son robóticos y pueden seguir la luz del sol), condiciones medioambientales como nubosidad, limpieza del cielo y hasta la periodicidad con que se limpian

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

los paneles. Para poder determinar la cantidad de paneles solares instalados actualmente en el mundo, se deben hacer cálculos puntuales por país de instalación, debido a todos los factores que influyen en este cálculo (características técnicas, capacidad de generación, lugar y modo de instalación, etc.). Se toma como ejemplo los datos suministrados sobre el Reino Unido, donde su capacidad actual de 15.7 GW, con 1.5 millones de paneles instalados, dando como resultado 97 paneles por megavatio (MW) instalado (The Eco Experts, 2024).

En Colombia, según reporte del Stockholm Environment Institute en su informe de 2022, había una capacidad instalada de 290 MW, y se sumaron otros 180 MW en 2023, para un total de 470 MW (Sustainable Energy Initiative (SEI), 2023). En términos de paneles este valor se traduce en 1.120.000 paneles instalados, algunos de los cuales se empezaron a instalar desde mediados de 2012. Entre los proyectos más relevantes instalados en Colombia se encuentran los parques solares La Loma, La Sierpe, Canal del Dique, El Paso, Celsia, Castilla y San Fernando, sólo por nombrar algunos (Conoce algunos de los proyectos de energía solar en Colombia, 2022).

Según los fabricantes, los paneles tienen una vida útil aproximada de 25 años (Forbes, 2023) y se espera que al cabo de ese tiempo el rendimiento del panel se haya disminuido entre 8% y 20%. Sin embargo, las cifras muestran una realidad muy diferente por varios factores como la tasa de degradación, el surgimiento de nuevas tecnologías o las políticas estatales, de los cuales se hace un análisis a continuación:

**Tasa de Degradación:** se ha encontrado que factores como el polvo, la arena, las heces animales y demás factores del medio ambiente circundante, contribuyen a la aceleración de la vida útil del panel. Además de lo anterior, en algunos casos, malas prácticas de limpieza causan rayaduras en la superficie que disminuyen su capacidad de captación de energía solar FV; por otro lado, en muchas ocasiones, malas prácticas de transporte o instalación, o el empleo de mano de

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

obra no calificada, ocasionan que los paneles terminen dañados o fracturados incluso antes de ser instalados. Finalmente, la fatiga eléctrica en los componentes electrónicos genera cambios en el panel mucho antes de cumplir su tiempo de vida útil (Economic lifetimes of solar panels, 2022).

**Surgimiento de nuevas tecnologías:** Las nuevas tecnologías de construcción permiten tener unidades más eficientes a menor costo, lo que implica que los implementadores de proyectos propicien el cambio de sistemas antiguos mucho antes de cumplir el tiempo de vida útil. Si bien son diseñados para durar hasta por 30 años, la “obsolescencia programada” es una de las estrategias comerciales que más aporta Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en el mundo y los paneles no se escapan de esta dolorosa realidad. Las dimensiones no han cambiado, ya que el tamaño estándar en el panel permite que su implementación sea más sencilla para los instaladores; sin embargo, si ha mejorado su capacidad energética, pasando de 300W a 600W instalando paneles monocristalinos en el mismo espacio (Hou, X. 2023).

**Políticas Estatales:** El país se encamina hacia una era de transición energética de combustibles fósiles a energías limpias que impulsarán proyectos, no sólo de gran calado sino también municipales, de comunidades o de individuos que quieran hacer parte de esta nueva ola energética. La política pretende que el precio de la energía eléctrica no sea fijado por el precio más alto entregado por la “energía enfermiza” sino que la fórmula sea modificada para poder acceder de manera masiva y hacer parte de este nuevo cambio climático que se empieza a volver popular cada vez más en el mundo, como se resume del discurso del presidente Gustavo Petro en la inauguración del Parque Solar La Loma en el Cesar, el pasado 13 de febrero de 2024.

Desafortunadamente, a medida que el mundo se encamina hacia una era de mayor adopción de energías renovables, se vislumbra la preocupación emergente de qué hacer con los residuos de dichas tecnologías. Si bien su empleo representa una solución prometedora para reducir las

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

emisiones de carbono y avanzar hacia una matriz energética más limpia, su rápida expansión plantea grandes desafíos en términos de gestión de residuos electrónicos. Es crucial considerar cómo abordar de manera efectiva y sostenible esta nueva fuente de residuos, garantizando así que la transición hacia la energía solar sea verdaderamente ecológica y responsable desde su producción hasta su disposición final.

El estudio publicado en 2022 en la revista *International Journal of Production Research* “Cleaning after solar panels: applying a circular outlook to clean energy research”, da un panorama más aterrizado con estudios realizados en Estados Unidos, los cuales se pueden extrapolar en la mayoría de sus aspectos al caso de Colombia. Según dicho estudio, los incentivos financieros son el punto de partida para el reemplazo temprano de los paneles solares. Así, un panel de hace 15 años que producía 200W, será fácilmente reemplazable por uno de las mismas dimensiones y menor peso, capaz de producir en la actualidad 600W a un costo 10 veces menor que el primero. Esto ha hecho que en la última década los precios de los paneles solares hayan caído 85%, por lo que será apenas normal reemplazarlos con una periodicidad que, según el *International Journal of Production Research*, podría ser tan crítica como de hasta 3 años por generación.

En este sentido, para el año 2023 ya era económicamente viable cambiar los paneles instalados entre 2012 y 2015. Con lo que predice el estudio, se espera que la cantidad de desechos de paneles solares sólo en Estados Unidos sea de 300.000 toneladas métricas; este valor podría ser hasta 50 veces mayor que lo pronosticado por la *International Renewable Energy Agency (IRENA)* para el año 2030.

Además, la cantidad de residuos producidos por paneles podría ser 2.5 veces mayor que la producción de los mismos en los próximos 10 años y no en 30 como registra IRENA. Es de aclarar que el estudio se centra en los hogares, los cuales en muchos casos no tendrán un músculo

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

financiero tan grande para realizar cambios tan periódicos, pero si se traslada al sector industrial, se hará con mucha más frecuencia el relevo generacional de paneles, pues mayor capacidad de generación aumenta las ganancias y estabiliza mejor el sistema.

En cualquier caso, en términos generales, el reemplazo de paneles es tan atractivo y beneficioso, que el problema central es el manejo de los residuos, su reciclaje y recuperación de materiales para la elaboración de nuevos productos. De hecho, no se puede tener en cuenta la posibilidad de remanufactura pues, a pesar de existir la posibilidad de poder retornar al mercado en condiciones casi iguales a las de su primera venta, se entiende que los paneles antiguos serán reemplazados por mejores tecnologías más eficientes y económicas.

Con respecto a Colombia, se espera que tenga una capacidad instalada de generación de 1.7 GW en 2030, por lo que es urgente regular los aspectos relacionados con la fabricación, consumo y disposición final de los paneles solares. La Unión Europea (UE), pionera en esta materia, definió a los paneles solares como parte de los RAEE estableciendo una reglamentación con respecto a la disposición de esta tecnología y, aunque otros países como Estados Unidos y Japón no tienen claras sus políticas de manejo de residuos de paneles solares Fotovoltaicos (PV), se espera que en los próximos años se adopten políticas similares a la UE.

Actualmente no existe en Colombia reglamentación dirigida al reciclaje y aprovechamiento de materiales provenientes de paneles solares End of Life (EoL). Además, la ausencia de una infraestructura adecuada para el manejo de estos residuos podría llevar a un aumento en la contaminación y la pérdida de materiales valiosos que podrían ser reutilizados.

En el ámbito mundial, las empresas que han implementado métodos de reciclaje y recuperación de materiales a partir de paneles solares EoL manejan un “secreto comercial” que impide conocer al detalle los procesos involucrados en su cadena de producción. En vista de lo

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

anterior, se hace necesario realizar una búsqueda en las fuentes bibliográficas de la UIS sobre procesos exitosos investigados al rededor del mundo, los cuales podrían ser aplicados para el tratamiento de paneles EoL en Colombia.

En el Apéndice A, se ha recopilado información sobre la reglamentación que se tiene en los principales países donde se manejan granjas solares, sobre el reciclaje de paneles solares EoL, mostrando los diferentes enfoques y tratamientos dados por estos gobiernos.

### **3. Metodología**

La metodología utilizada para el presente trabajo de grado estuvo compuesta por cinco fases, las cuales se detallan a continuación.

#### **3.1. Fase I: Identificación de los componentes de los paneles solares fotovoltaicos**

Se identificaron las empresas de paneles fotovoltaicos proveedoras de manera mayoritaria en Colombia, así como los tipos de paneles más comercializados. De manera complementaria, se consultó documentación técnica a partir de las principales bases de datos académicas proporcionadas por la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander (UIS), tales como ScienceDirect®, Springer®, Nature®, Oxford Academic®, entre otras, para identificar y clasificar los componentes, describiendo materiales, tecnologías y procesos de fabricación comúnmente utilizados.

#### **3.2. Fase II: Análisis de estrategias existentes para la separación de los componentes**

Se llevó a cabo una revisión de la bibliografía disponible para investigar las estrategias de separación de componentes de paneles solares empleadas en otros países. Esta etapa incluyó la identificación de estudios de caso, informes técnicos y artículos científicos relevantes que describían métodos y tecnologías utilizadas en el reciclaje y separación de componentes de paneles solares. Las fuentes de información fueron las bases de datos académicas de la biblioteca de la UIS, documentos técnicos de la industria y de organizaciones internacionales dedicadas al reciclaje de RAEE.

#### **3.3. Fase III: Aspectos a considerar para la viabilidad de implementación en Colombia**

Teniendo en cuenta la información recopilada, se realizó una evaluación a partir de cuatro aspectos importantes que clarifican la ruta para el reciclaje y aprovechamiento de los paneles solares EoL. Los aspectos tenidos en cuenta fueron: técnico, económico, regulación ambiental y

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

desafíos logísticos. Esto propició la obtención de una base sólida para la toma de decisiones futuras por parte de fabricantes, distribuidores y organizaciones de reciclaje, facilitando la implementación de estas estrategias de manera efectiva y sostenible.

### **3.4. Fase IV: Evaluación de los métodos de aprovechamiento y disposición de materiales**

Esta evaluación incluyó la investigación de métodos de reciclaje específicos para cada tipo de material, considerando procesos mecánicos, químicos y térmicos. Se analizó la viabilidad técnica de cada método, así como el impacto ambiental de las diferentes rutas de disposición. Los datos técnicos de procesos industriales de reciclaje y estudios de caso fueron fundamentales en esta fase.

### **3.5. Fase V: Análisis de las rutas de aprovechamiento**

Se realizó un análisis de datos y se elaboró una propuesta de ruta concreta para el aprovechamiento o disposición de los materiales. Esta actividad incluyó el desarrollo de escenarios y modelos de gestión de residuos fotovoltaicos.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Identificación de los componentes de los paneles solares fotovoltaicos

#### comercializados mayoritariamente en Colombia

La evolución de la tecnología de los paneles solares fotovoltaicos se divide en tres generaciones desarrolladas (o en fase de desarrollo) hasta 2024: i) la primera generación se compone de paneles cuya parte funcional está constituida por silicio cristalino; ii) la segunda generación se han fabricado empleando película delgadas principalmente de silicio amorfo, telurio de cadmio y diseleniuro de cobre, indio y galio; iii) y, finalmente, la tercera generación se caracteriza por la fabricación de películas de células sensibilizadas con colorantes (DSSC), células orgánicas, de perovskita, y de punto cuántico.

Dentro de Colombia el despliegue de granjas solares fotovoltaicas es impulsado por tres grandes sectores. El sector de hidrocarburos, teniendo como principal referencia el Parque Solar Castilla en los Llanos Orientales desarrollado por Ecopetrol para abastecer parte de energía eléctrica en el campo petrolero Castilla; la producción agrícola e industrial, dentro de las cuales Celsia Energía posee varios proyectos enfocados a empresas del sector en los departamentos de Valle del Cauca, Tolima, Sucre y Santander; y el consumo de electricidad en hogares con acceso limitado al Sistema Interconectado Nacional (SIN), encontrándose en varios departamentos de Colombia grandes proyectos de generación solar que potencian la capacidad del SIN para abastecer a las familias, como son Bosques Solares de los Llanos y Delphi Helios en el Meta, La Loma y El Paso en Cesar y La Sierpe en Sucre.

La Tabla 1 presenta los proyectos de generación solar de más de 10 MW que operan en Colombia en la actualidad (año 2024), donde se observa una clara predominancia del uso de paneles solares de primera generación fabricados de obleas de silicio.

# PROTOCOLO GESTIÓN RAE E PANEELES SOLARES EN COLOMBIA

**Tabla 1** *Proyectos de generación solar mayores a 10 MW en Colombia*

*Proyectos de generación solar mayores a 10 MW en Colombia*

Proyecto	Capacidad [MW]	Ubicación	Empresa Propietaria	Empresa Constructor	Tipo Panel	Cantidad de Paneles instalados	Marca de Paneles
Celsia Solar Colombia (Valle de Cáuca, Tolima, Santander y Sucre)	260	Valle de Cáuca, Tolima, Santander y Sucre	Celsia Energía	Celsia Energía	Silicio Monocristalino	230.000	Módulo Solar Monocristalino Powest 300W NERM300-8300
La Loma Solar	170	Cesar	Enel Power	Green Sin Información	Módulo bifacial de 315 WP Motorizado	312.430	ZnShinesolar ZXM6-HLD120 Series
El Paso Solar	99,9	Cesar	Enel Power	Green JinkoSolar Holding	Silicio Monocristalino 345 W	275.000	Jinko Solar JKM315PP
Parque Solar San Fernando	61	Meta	Ecopetrol	Sin Información	Panel Bifacial Motorizado	115.000	Sin Información
Parque Solar Castilla	21	Campo petrolero Castilla	Ecopetrol	Ecopetrol y AES Colombia	Panel Bifacial	54.500	Sin Información
La Sierpe	19,9	Sucre	Aages	Andean Amazonian Group of Energy Solutions	Panel Bifacial de 400W	65.520	Módulo monocristalino DUOMAX twin TSM-DEG15MC.20(II)
Bosques Solares de los Llanos 1	19,9	Meta	Trina Solar	Trina Solar	Panel Solar Policristalino de 315 W	36.000	TrinaSolar EL TALLMAX TSM-PD14
Bosques Solares de los Llanos 2	19,9	Meta	Trina Solar	Trina Solar	PPanel Solar Policristalino de 315 W	36.000	TrinaSolar EL TALLMAX TSM-PD14
Bosques Solares de los Llanos 3	19,9	Meta	Trina Solar	Trina Solar	PPanel Solar Policristalino de 315 W	36.000	TrinaSolar EL TALLMAX TSM-PD14
Bosques Solares de los Llanos 4	19,9	Meta	Trina Solar	Trina Solar	Panel Solar Policristalino de 315 W	36.000	TrinaSolar EL TALLMAX TSM-PD14
Bosques Solares de los Llanos 5	19,9	Meta	Trina Solar	Trina Solar	Panel Solar Policristalino de 315 W	36.000	TrinaSolar EL TALLMAX TSM-PD14
Delphi Helios	16	Meta	EBSA	DELPHI CAPITAL PARTNERS S.A.S y EBSA	Silicio Policristalino	27.111	Módulo Policristalino Jinko 600W
Parque Solar Canal del Dique	12,3	Arjona, Bolívar	Enerland Group	Enerland Group	Longi 450W	12.330	Panel solar Longi Monocristalino de 450 Wp PERC (Passive Emittter Rear Cell)
<b>TOTAL MW Instalados</b>	<b>759,6</b>				<b>Total Paneles Instalados</b>	<b>1.271.891</b>	

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Esta es la tecnología dominante por su alta eficiencia energética, estabilidad, su bajo costo de comercialización y el grado de madurez tecnológico alcanzado (Gul, M. 2016). Se dividen en dos grupos:

**Paneles de Silicio Monocristalino:** Están fabricados a partir de un único cristal de silicio de alta pureza (proceso conocido como Czochralski), lo que les confiere una estructura cristalina uniforme y ordenada. Esta característica permite que los electrones se desplacen con mayor libertad, resultando en una mayor eficiencia energética (25%) en comparación con otros tipos de paneles, como los de silicio policristalino (Dobrzański, L. A. 2012). Los paneles monocristalinos son reconocidos por su distintivo color negro y su mayor capacidad para generar electricidad incluso en condiciones de baja luz, como en días nublados o al amanecer y atardecer. Aunque suelen ser más costosos de fabricar debido al proceso complejo de crecimiento del cristal, su mayor eficiencia y durabilidad los convierten en una opción preferida para instalaciones donde el espacio es limitado y se busca maximizar la producción de energía (Dias, P. 2018).

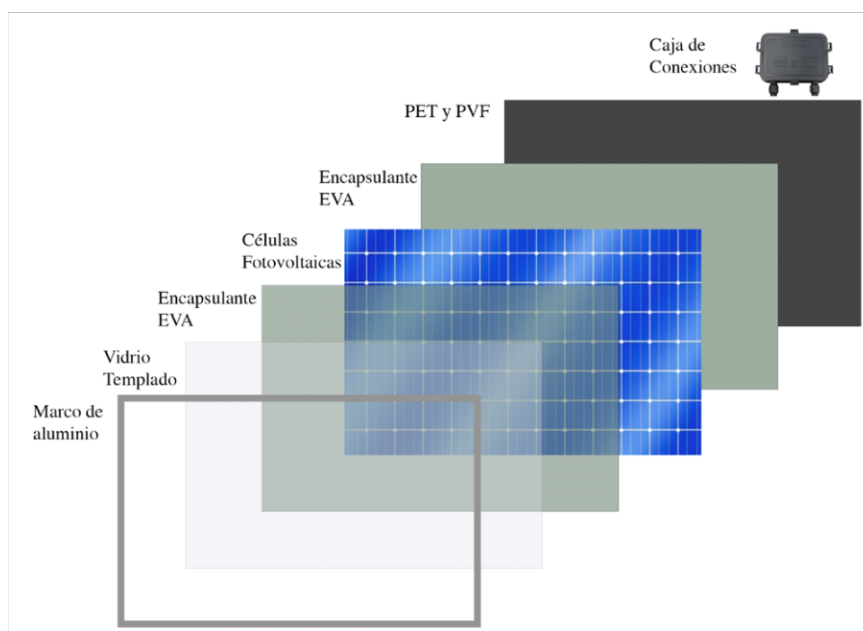
**Paneles de Silicio Policristalino:** Se crean a partir de múltiples cristales de silicio que se solidifican juntos en un molde. Este proceso de fabricación es menos costoso y más sencillo que el de los paneles monocristalinos, lo que los hace una opción más económica. Sin embargo, debido a la estructura desordenada de los cristales, la eficiencia energética de estos paneles es generalmente menor (entre 22% y 23%), ya que la irregularidad en la disposición de los átomos de silicio dificulta el flujo de electrones (Ndiaye, A. 2013). Los paneles policristalinos se reconocen por su color azul en capas y son ampliamente utilizados en instalaciones solares donde los costos iniciales son una consideración importante. A pesar de su menor eficiencia en comparación con los monocristalinos, son duraderos y adecuados para muchas aplicaciones residenciales y comerciales (Bogust, P. 2020) (Gerold, E. 2024).

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

En cualquiera de los dos tipos de paneles, las células solares están conectadas en combinaciones de series y paralelos a través de tiras de cobre (Cu). Se encuentran dispuestas sobre una lámina de tereftalato de polietileno (PET) y fluoruro de polivinilo (PVF) y una capa de aglutinante de etileno acetato de vinilo (EVA) en la parte superior e inferior de la célula solar. La superficie del panel es protegida por una película de vidrio templado con un marco metálico de aluminio que rodea la estructura (Green, M.A. 1982) (Parida, B. 2011) (Figura 1).

**Figura 1** *Estructura y composición del panel solar PV de primera generación*

*Estructura y composición del panel solar PV de primera generación*



El panel solar contiene alrededor del 75% del peso total en vidrio. El vidrio debe cumplir varias características dentro de la estructura del panel como ser una barrera física de protección para las células solares brindando resistencia a intemperie (factores ambientales como lluvia, nieve, granizo, polvo, viento y cambios de temperatura), ser altamente transparente para permitir la transmisión de luz solar hacia las células fotovoltaica; y, finalmente, proporcionar aislamiento eléctrico evitando que los componentes internos del panel estén expuestos a factores externos que puedan causar fallos y corto circuitos.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Por otro lado, un 10% del peso del panel lo conforman el encapsulante EVA y la lámina de soporte posterior PET y PVF. El EVA actúa como una capa protectora contra impactos mecánicos, humedad, polvo y otros factores ambientales; sirve como adhesivo que mantiene las células solares unidas al vidrio frontal y a la lámina posterior, y como aislante para ayudar a prevenir los cortos circuitos entre las capas del panel. Tiene transparencia óptica permitiendo que la mayor cantidad de luz llegue a las celdas solares y, finalmente, proporciona durabilidad y resistencia a la radiación UV (IEC. 2016). La lámina de PET y PVF sirve como barrera física que proporciona resistencia mecánica, contra humedad y contaminantes ambientales y ayuda a mantener la integridad estructural del panel. Ofrece resistencia a los rayos UV y a la degradación química (Gupta, A. 2022).

El resto de los materiales que conforman un panel de primera generación se concentra en el aluminio (8% en peso) que, por sus características de alta conductividad eléctrica, bajo peso y resistencia a la corrosión, es el material ideal para soportar y proteger los módulos solares de diversas condiciones ambientales. El aluminio también está presente en las borneras de las cajas de conexiones (Marija Maisch. 2022); las células de Silicio (Si) (5% en peso) que son la parte fundamental del panel encargadas de convertir la luz del sol en electricidad mediante el efecto fotovoltaico (Al-Ezzi, A. S. 2022); las interconexiones de cobre (1% en peso) que se sueldan a las células de silicio y transportan la energía producida por el panel hasta la caja de conexiones; y otros metales (0.1% en peso) como la plata, presente en finos hilos sobre la célula de silicio y encargada de recolectar los electrones liberados en el proceso fotovoltaico y conducirlos hasta las láminas de cobre, y aleación de estaño-plomo empleada en las soldaduras por su bajo punto de fusión, que facilita el proceso de soldadura sin dañar las células solares, posee excelente

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

conductividad eléctrica que reduce la resistencia y mejora el flujo de corriente eléctrica en el panel (NREL. 2019) (Zuser, A. 2011).

Aunque actualmente los paneles solares PV de primera generación son los más utilizados en Colombia, es probable que en el futuro se observe un aumento significativo en la adopción de paneles de segunda y tercera generación. En previsión de esta tendencia, el Apéndice B proporciona información ampliada sobre estos tipos de tecnologías.

### **4.2. Estrategias existentes para la separación de los componentes de los paneles solares**

Teniendo en cuenta que el reciclaje de paneles solares es una práctica que apenas se empieza a implementar a nivel mundial, se toman como referente algunas empresas con técnicas que logran mitigar el problema del vertido de los paneles en rellenos sanitarios.

Empresas como Veolia (que opera en varios países a nivel mundial), SolarCycle y Desktop Depositall (en Estados Unidos); están a la vanguardia en la implementación de procesos de reciclaje de paneles solares. Veolia, por ejemplo, ha establecido la primera planta en Europa dedicada exclusivamente al reciclaje de estos paneles, logrando una tasa de recuperación de hasta el 95% de los materiales. La compañía procesa y reutiliza componentes claves, contribuyendo a la economía circular y reduciendo el impacto ambiental de los residuos solares (Veolia. 2018).

En Estados Unidos, SolarCycle ha desarrollado un proceso innovador que permite recuperar un 95% de los materiales de los paneles solares, un avance significativo comparado con los métodos convencionales que sólo logran recuperar el 50% de estos. Además de aprovechar el aluminio, el silicio y otros metales, esta empresa tiene contratos con grandes actores de la industria solar, lo que contribuye a mantener los materiales reciclados en la cadena de producción (Kennedy, R. 2024).

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Sin embargo, aún existen desafíos técnicos. Los métodos actuales de reciclaje de paneles solares, a menudo basados en procesos de reciclaje de otros RAEE, presentan problemas como la baja pureza de los materiales recuperados y la contaminación con el encapsulante EVA, lo que reduce la calidad de los productos reciclados. A pesar de esto, la industria sigue avanzando hacia la optimización de estos procesos, con innovaciones para mejorar la eficiencia y pureza de los materiales recuperados (Kennedy, R. 2024).

Los procesos iniciales utilizados a nivel de investigación presentan similitudes con los usados en la industria; sin embargo, en procesos posteriores, se toman diferentes caminos de procesos térmicos y químicos para lograr una mejor recuperación de los materiales. A continuación, se presentan algunas de estas técnicas implementadas a nivel de investigación y desarrollo.

Inicialmente, se parte de una etapa que consiste en separar los paneles intactos de los dañados. Los paneles en buen estado ofrecen mayor posibilidad de extraer obleas de silicio intactas y componentes valiosos, lo que maximiza la eficiencia del proceso. Por su parte, los paneles fracturados, que han sufrido daños parciales o totales y que se consideran inviables para la extracción de componentes, son dirigidos a la ruta de separación para extraer los materiales aprovechables. Posteriormente, se realiza una limpieza con agua y/o aire a presión para eliminar polvo y suciedad, y continúa se separa la caja de conexiones, que se compone de cables de cobre y/o aluminio y diodos que se usan para proteger y conectar el panel. Todos estos materiales que componen la caja de conexión pueden seguir la ruta de reciclaje de RAEE tradicional aplicada a otros equipos electrónicos (Jawaid, M. 2023).

El siguiente paso es la separación mecánica (manual o con la ayuda de brazos robóticos) de los marcos de aluminio, que se agrupan según su tamaño (para permitir su almacenaje y/o

## PROCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

embalaje) y se clasifican como restos de extrusión que tienen su propio mercado (R. Vinayamoorthi. 2023).

La etapa siguiente está relacionada con la separación de las capas del panel y el vidrio templado. El mayor desafío para lograr un reciclaje exitoso de paneles solares fotovoltaicos de primera generación radica en la eliminación de la capa de EVA. Este material, que actúa como encapsulante, es esencial para proteger las células solares y asegurar la integridad estructural del panel. Sin embargo, su eliminación es compleja debido a su resistencia térmica y química, lo que obstaculiza el acceso y la recuperación de componentes valiosos como el silicio, la plata y otros metales. La dificultad en remover el EVA sin contaminar los materiales subyacentes limita la pureza de los materiales reciclados, lo que a su vez reduce su valor y reutilización. El desarrollo de métodos más eficientes para descomponer o separar estas capas es crucial para mejorar la viabilidad económica y ambiental del reciclaje de paneles solares fotovoltaicos (Gerold, E. 2024) (Klugmann-Radziemska, E. 2018).

En este sentido, existen diferentes estrategias actualmente que involucran procesos térmicos y/o químicos. El proceso térmico consiste en un proceso de pirólisis en hornos de cinta transportadora o reactores de lecho fluidizado en atmósfera inerte (nitrógeno) y se ha utilizado desde varios enfoques, algunos generales y otros para un tipo de panel específico (Preet, S. 2024). Este proceso elimina hasta el 99,97% de la resina de las células fotovoltaicas (Chen, W. S. 2020). El vidrio se coloca hacia abajo y se calienta a una tasa de 15 °C/min hasta 450-480 °C con el fin de descomponer la capa de EVA evitando la ruptura de la oblea de silicio, lo que reduce el costo de producción de obleas y hace más atractivo su comercio (Frisson, L. 2020). Por otro lado, permite recuperar vidrio, plata y plomo sin desecharlos en agua (Bohland, J.R. 1997). No obstante, el

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

proceso produce humos y gases tóxicos debido a la quema de las capas de EVA, PET y PVF del panel, lo que implica la necesidad de realizar un tratamiento posterior a dicha corriente de gas.

En cuanto a los procesos químicos, la eliminación de la resina EVA se realiza empleando disolventes orgánicos como 4-metil-2-pentanona, benceno, tetrahidrofurano, tricloroetileno, tolueno, acetona y alcohol etílico, entre otros (Preet, S. 2024). Este proceso permite la recuperación del vidrio y la separación de las demás capas para procesos posteriores. Las obleas recuperadas se pueden usar en la producción de paneles con una eficiencia comparable a la del producto original (Shin, J. 2017).

La última parte del proceso de separación consiste en la recuperación de los metales valiosos, normalmente mediante procesos de lixiviación en medio ácido y/o básico. Jung, B et al., informó sobre la recuperación de materiales valiosos como silicio, aluminio, plata, cobre y plomo de paneles solares PV sumergiendo el panel en ácido nítrico 5M (Jung, B. 2016). La plata también es posible recuperarla por galvanoplastia inversa con una pureza del 99,9%, mientras que el silicio es recuperable también mediante grabado alcalino con una pureza de 4N (Preet, S. 2024). También se ha reportado un proceso de lixiviación y extracción en el que se empleó ácido nítrico 4M para recuperar silicio, ácido clorhídrico 1M para recuperar plata y aluminio y Na-Cyanex 272 en queroseno para la separación de la plata y el aluminio (Chen, W. S. 2020). Finalmente, Modrzynski et al., realizaron un proceso de lixiviación asistida electroquímica mediante el uso de electrodos de diamante dopados con boro, logrando recuperar plata, cobre y estaño de los paneles solares PV (Modrzynski, C. 2021).

Como estos hay otros procesos que mostraron gran efectividad en la obtención de materias primas a partir de paneles solares EoL; por lo que se puede concluir que la correcta mezcla de

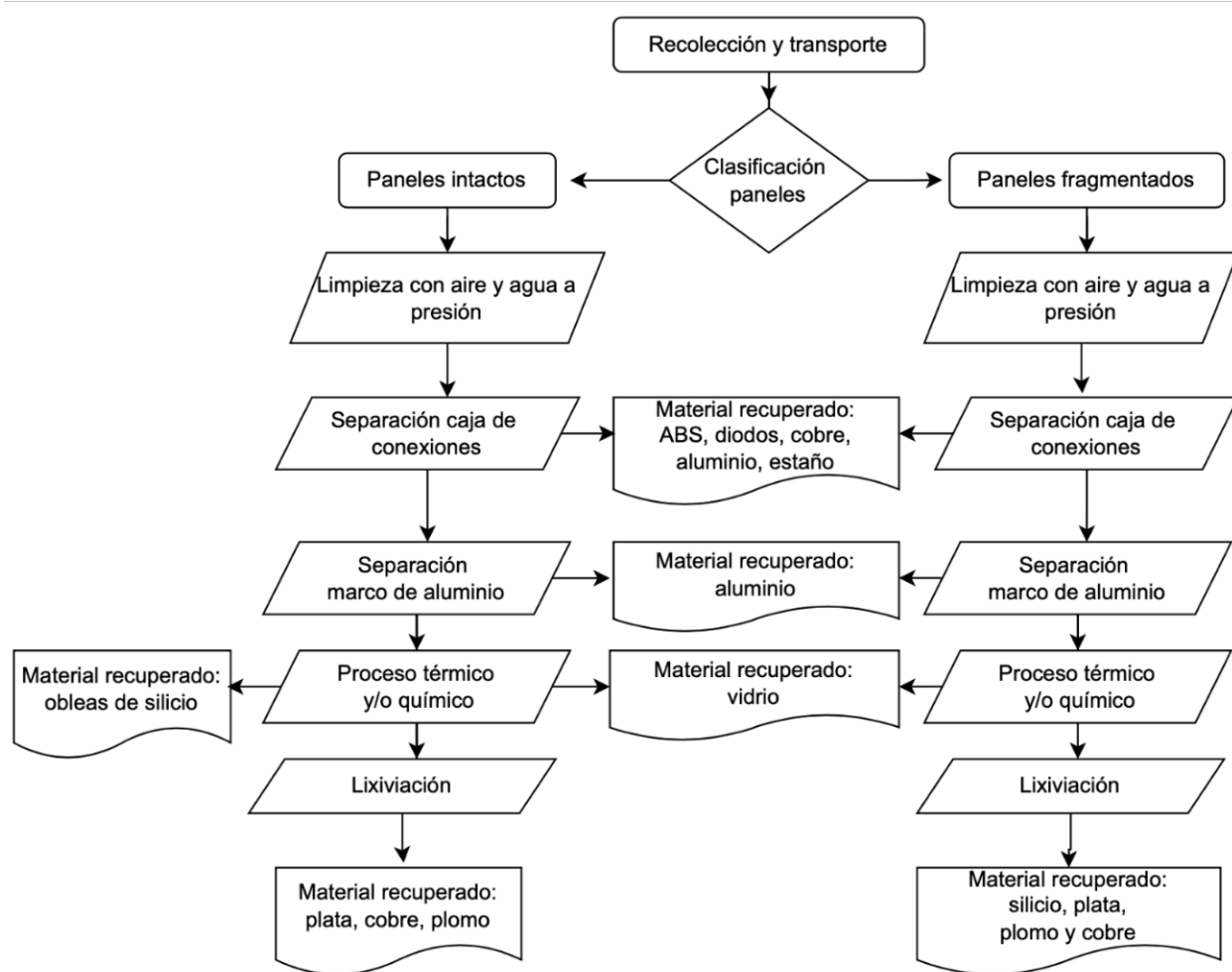
## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

estrategias de reciclaje tanto mecánicas, térmicas y químicas conducen al aprovechamiento exitoso de los paneles solares PV evitando su traslado a los rellenos sanitarios.

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 2 se resumen los procesos empleados durante el reciclaje de paneles solares EoL.

**Figura 2** Estrategias de separación de componentes y recuperación de materiales de paneles solares

*Estrategias de separación de componentes y recuperación de materiales de paneles solares*



### 4.3. Aspectos a considerar para la viabilidad de implementación en Colombia

Para evaluar la viabilidad de implementar las estrategias de separación estudiadas en el contexto colombiano, es necesario considerar los aspectos, técnico, económico, de regulación ambiental y de infraestructura y desafíos logísticos.

**Aspectos Técnicos:** En Colombia, la ausencia de plantas de reciclaje de paneles solares presenta tanto oportunidades como desafíos. Por un lado, existe la posibilidad de implementar plantas con procesos novedosos y eficientes que permitan la recuperación de materiales con alto grado de calidad. Por otra parte, se requiere gran inversión en la infraestructura adecuada. Los procesos mecánicos primarios (como la remoción y clasificación del marco de aluminio y la remoción y desmantelamiento de la caja de conexiones) pueden iniciarse con mano de obra y a medida que se vaya logrando un crecimiento, implementar sistemas robóticos para acelerar los procesos. Sin embargo, el proceso térmico para la separación de las capas y eliminación del EVA y el encapsulante, requiere hornos especializados con sistemas de tratamiento de gases que podrían no estar disponibles a nivel local, por lo que se podrían importar o fabricar a medida por la industria local. Además, se deben considerar sistemas para tratamiento de humo y gases contaminantes (Feng, Y. 2023).

En los procesos químicos, el uso de solventes para la eliminación del EVA y/o las etapas posteriores de recuperación de metales, requiere experiencia en la manipulación de productos químicos a escala industrial en el país, además del manejo posterior aplicado a los solventes para recuperarlos y/o darles un tratamiento final adecuado. Sin embargo, esta metodología podría ser efectiva si se adoptan tecnologías probadas en otros países (Click, N. 2024). Iniciar con una prueba piloto podría ser una estrategia efectiva para evaluar la viabilidad de estas técnicas en Colombia (Farrell, C. C. 2020).

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Aspectos Económicos:** Implementar un sistema de reciclaje de paneles solares implica un análisis de costos de infraestructura, operación y mantenimiento, así como el retorno de inversión a través de la venta de materiales recuperados. La inversión inicial debe incluir las instalaciones (con las máquinas necesarias de acuerdo a los métodos elegidos como hornos para procesos térmicos y laboratorios para procesos químicos), centros de acopio y logística, y un centro administrativo.

El costo operativo estaría asociado a mano de obra (que podría incluir técnicos especializados), consumo energético (especialmente para hornos), y costos de productos químicos. También se tendría en cuenta el costo asociado con la recolección de paneles, almacenamiento de materiales recuperados, comercialización de los mismos y tratamiento de residuos de solventes químicos.

En cuanto al retorno de inversión se tendría en cuenta que la calidad de los materiales recuperados permitiría un mejor precio y los haría más atractivos para los compradores. Incentivos gubernamentales y alianzas estratégicas con empresas (productoras, comercializadoras e instaladoras ) serían clave para asegurar un retorno económico adecuado (Daniela-Abigail, H.-L., 2022).

**Regulación ambiental:** La normativa en Colombia sobre RAEE aún es limitada. Actualmente, no hay leyes específicas que regulen el reciclaje de paneles solares por lo que es necesario incentivar desde los gobiernos la legislación de leyes que permitan estas prácticas en condiciones favorables para las empresas recicladoras.

Se sugiere que Colombia adopte políticas similares a las de la Unión Europea, donde el reciclaje de paneles solares está regulado bajo la Directiva de RAEE (Ver Apéndice A). Las

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

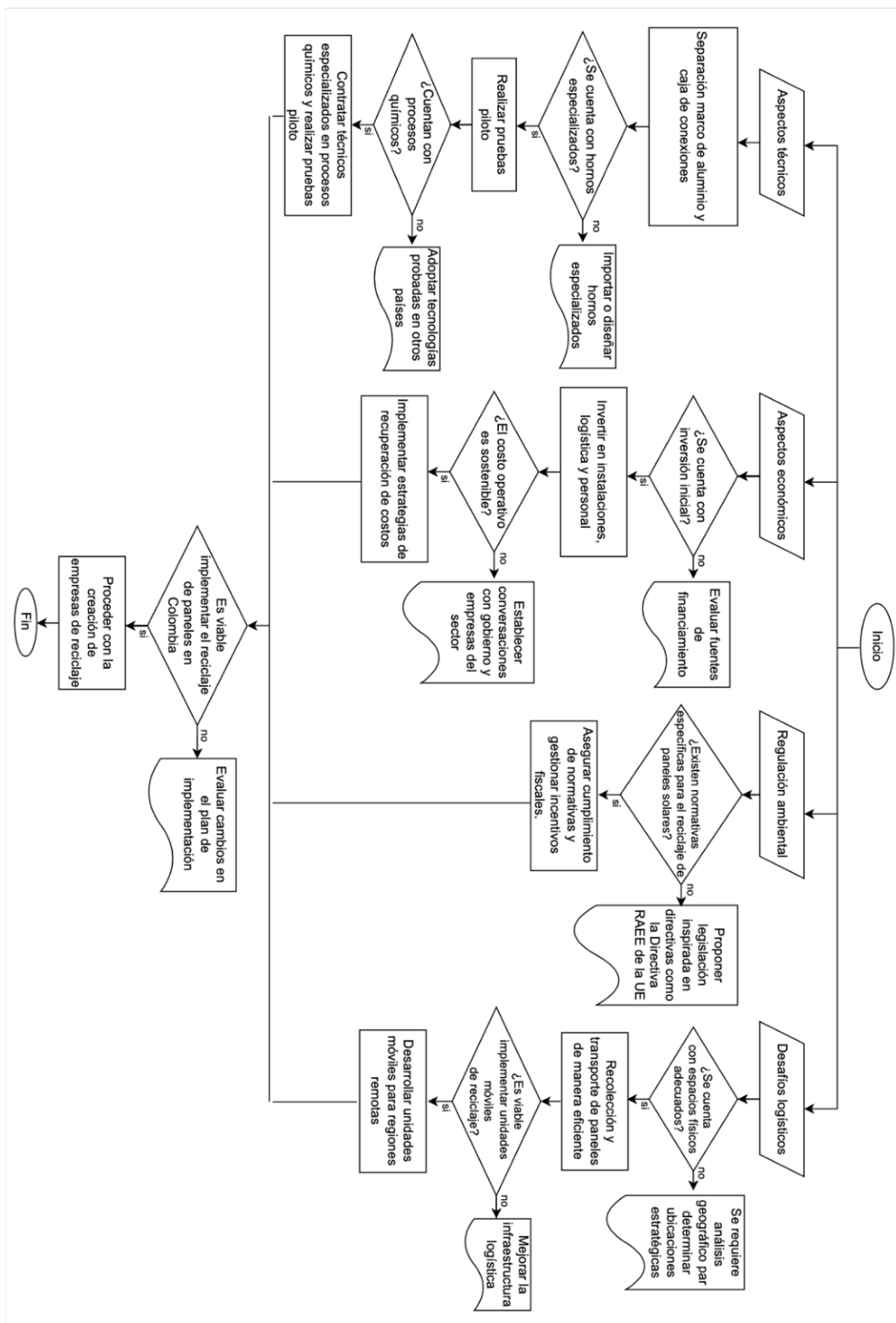
normativas podrían incluir la obligatoriedad a los fabricantes y comercializadores de gestionar el ciclo de vida de sus productos y la creación de incentivos fiscales para fomentar el reciclaje.

También se podrían generar condiciones para una economía circular que aproveche las ventajas de la matriz energética de Colombia, la cual posee 1820 GW de energía renovable (solar y eólica) (UPME. 2024), impulsando de esta manera la manufactura de paneles solares con baja emisión de  $CO_2$ , y con un acceso inmediato a las materias primas producto del ejercicio de reciclaje (Deshmukh M. K. G. 2023).

PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Figura 3 Aspectos considerados para la aplicabilidad en Colombia

Aspectos considerados para la aplicabilidad en Colombia



## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Desafíos logísticos:** Uno de los principales desafíos en Colombia es la diversidad geográfica, que afecta la recolección y transporte de los paneles solares EoL. Las plantas de reciclaje se deberían ubicar cerca de las granjas solares, para minimizar los costos de transporte. Se podrían manejar centros de recolección descentralizados cercanos a las regiones con mayor densidad de instalaciones solares, permitiendo una recolección eficiente y bajos costos de transporte (Iakovou, E. 2024). Otra solución podría ser el desarrollo de unidades móviles de reciclaje que puedan desplazarse a diferentes regiones del país para procesar los paneles solares en sitio.

En la Figura 3 se presenta un diagrama de flujo donde se resume los aspectos y pasos a seguir que deben ser considerados para la creación de una empresa de reciclado de residuos de paneles solares en Colombia.

### **4.4. Evaluación de los métodos de aprovechamiento y disposición de los materiales**

Con los avances en investigación y nuevas tecnologías probadas se dispone en la actualidad de una pluralidad de métodos para el reciclaje y separación de materiales aprovechables de los paneles solares EoL. Teniendo en cuenta la vida media de 25 años, los paneles instalados entre el año 2000 y 2010 son susceptibles de cambio, además de los que se hayan fracturado dentro del proceso logístico de instalación (IRENA 2023).

Dentro de los métodos evaluados se descartan los métodos tradicionales que consisten en la trituración del panel y separación mecánica (en turbinas centrífugas empleando aire a presión o gravedad) para comercializar tres grupos de materiales que son metales, vidrio y silicio. Esta técnica utilizada por cuatro de cada cinco empresas estudiadas en la UE evita el problema de llevar el panel a los rellenos sanitarios; sin embargo, el producto tiene un valor bajo en el mercado por el grado de contaminación por EVA y otros componentes en menor escala (Ngagoum Ndalloka,

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Z. 2024). En este sentido, se evalúan métodos que fomentan el correcto reciclaje y aprovechamiento de vidrio, aluminio, caja de conexión, y elementos principales como silicio, cobre, plata, estaño y plomo. Se tienen en cuenta aspectos como el proceso aplicado, su viabilidad económica y técnica, la ruta de disposición final (si es necesaria) y el impacto ambiental del proceso (ventajas y desventajas).

Al aluminio presente en el marco se le aplica un proceso mecánico que puede ser manual o robotizado. En la primera opción se requiere mano de obra, no se requiere equipo especializado, se emplea fuerza y herramientas manuales y podría presentar deformación de los marcos al momento de removerlos, haciendo más difícil el apilamiento. Para la segunda opción se requiere equipos especializados (brazos robóticos) que son generalmente costosos; sin embargo, realizan el trabajo en una fracción del tiempo empleado en el método manual y el marco es removido sin deformarlo. El producto de este proceso son tiras de aluminio que se comercializan en la industria. Los dos procesos presentan un impacto ambiental positivo ya que no se generan residuos, contribuyen a reducir la minería de extracción, el aluminio es reutilizado en cadenas de producción y se reduce la emisión de CO<sub>2</sub>, aunque el proceso robótico presenta consumo de electricidad para los motores de los robots (Vinayagamoorthi. R. 2023).

La caja de conexiones se remueve del panel y se disgrega de manera manual. En el proceso se desmantelan y se separan la carcasa, diodos y conectores (que pueden ser de aluminio o de cobre). Los plásticos se comercializan en la industria de reciclaje específica de estos materiales. Los diodos pueden ser comercializados en la industria electrónica o con los fabricantes de paneles y el cobre/aluminio tiene su propio mercado de metales. En este proceso no se generan desechos, se reduce la minería de extracción y se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> (Tao and Yu, 2015) (Jung et al., 2016).

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Los demás materiales del panel se someten a procesos térmicos y químicos que podrían variar de acuerdo a los factores mostrados en el apartado anterior. El vidrio se recupera mediante procesos térmicos que varían en función de la integridad del panel. Se debe destacar que el vidrio que emplean los paneles solares no es convencional, presenta mayor calidad en cuanto a transparencia y resistencia lo que hace un producto mejor valorizado en el mercado que el vidrio común, destacándose como un componente clave en la tecnología solar. Para los paneles intactos se puede aplicar el proceso térmico de cuchilla caliente, para cortar la capa de EVA entre el vidrio y las demás capas del panel. El producto es vidrio que se comercializa en la industria. De acuerdo con el grado de pureza deseado, puede incluir una etapa de limpieza manual con disolventes químicos, logrando obtener vidrio de alta pureza. Durante el proceso se generan gases contaminantes que deben ser tratados, se consume electricidad para la mesa de corte y se tiene una baja emisión de CO<sub>2</sub>. Esta etapa ayuda a reducir la minería de extracción (Azeumo, M. F. 2019). Para los paneles fracturados, el proceso aplicado al vidrio puede ser la incineración en hornos, donde se eliminan las capas de encapsulante, logrando vidrio de grado solar. Requiere hornos con capacidad de tratamiento de gases contaminantes. Consume gas y electricidad, presenta emisiones de CO<sub>2</sub>, pero permite reutilizar el vidrio en las cadenas productivas y reduce la minería de extracción (Preet S. 2024).

El silicio se puede separar mediante procesos químicos y térmicos. En el proceso térmico se pueden emplear hornos de cinta transportadora o reactores de lecho fluidizado, que deben contar con tratamiento de gases contaminantes. Este proceso elimina el 99,97% de las capas de EVA, PET y PVF y permite recuperar células de silicio intactas de grado solar, que se comercializan en la industria de fabricación de paneles. Presenta emisión de gases contaminantes, consumo de gas y electricidad; pero se reduce la minería de extracción y favorece la reutilización de componentes

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

en la cadena productiva (Preet, S. 2024) (Chen, W. S. 2020) (Frisson, L. 2020). Por su parte, los procesos químicos consisten en eliminar la capa de EVA mediante el uso de disolventes orgánicos e inorgánicos. Se requiere mano de obra calificada para el manejo de productos químicos y de residuos a nivel industrial. Como resultado se tiene silicio de grado solar que es comercializado en las empresas productoras de paneles o de semiconductores. En la parte ambiental se generan residuos químicos (Preet, S. 2024) (Shin, J. 2017).

Los metales restantes se pueden extraer por lixiviación y el proceso presenta similitudes como el uso de mano de obra calificada en el manejo de productos y residuos químicos. Como producto final se obtienen metales (plata, plomo, cobre, estaño y aluminio) con alto grado de pureza (mayor al 95%), que se emplean en diferentes industrias, además de la solar. Se generan residuos químicos y se tiene un impacto positivo en el medio ambiente al reducir la minería de extracción.

### **4.5. Análisis de las rutas de aprovechamiento**

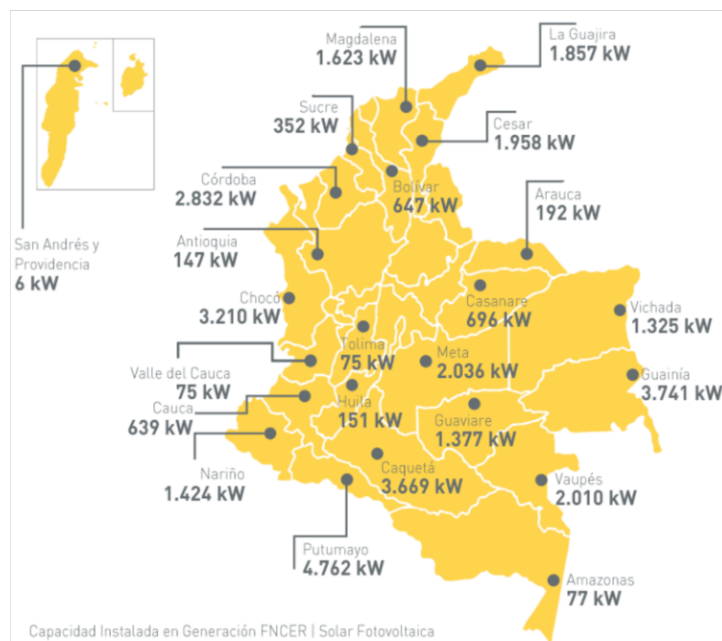
El reciclaje y aprovechamiento de materiales de paneles solares EoL se empieza a mostrar como una opción urgente pero económicamente atractiva, dada la cantidad de estos residuos y las investigaciones exitosas reportadas, que presentan diferentes opciones como base para generar una industria de reciclaje próspera. Partiendo de un escenario probable en el que Colombia adopte reglamentaciones como la Directiva RAEE de la UE, se tendrían condiciones aceptables para la creación de empresas con capacidad de aprovechar las ventajas del reciclaje con tecnologías modernas para los paneles solares EoL.

En la figura 4, se presenta la diversidad en la ubicación de los proyectos de energía solar implementados en Colombia.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Figura 4** *Capacidad instalada en Generación FNCER | Solar Fotovoltaica*

*Capacidad instalada en Generación FNCER | Solar Fotovoltaica*



Fuente: IPSE, 2022

Dada la diversidad geográfica que presenta nuestro país, el proceso se haría de manera descentralizada, contando con varios lugares de acopio y plantas de proceso. De esta manera, se optimiza al máximo la logística de transporte desde las granjas solares hasta los lugares de procesamiento. Por otro lado, aprovechando la capacidad de diseño e implementación local, se plantea impulsar una industria subyacente para la fabricación de hornos y/o laboratorios que cumplan con la reglamentación medio ambiental de bajas emisiones de CO<sub>2</sub> y demás necesidades técnicas necesarias para el proceso.

La ruta en concreto empezaría por la recolección y acopio de los paneles, seguido por la selección según su estado (rotos e intactos); limpieza, remoción de marco y caja de conexión de manera manual, aplicación de proceso de cuchilla caliente para separación del vidrio, seguido de

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

procesos químicos que permitan la recuperación de los materiales del panel, con alto grado de pureza. En una etapa inicial se comercializarían los materiales en las diferentes industrias y a futuro, se buscarían mecanismos para crear una industria de manufactura, aprovechando el carácter verde de nuestra matriz energética. De este modo se crearía una economía circular capaz de absorber hasta el 100% de los residuos de paneles solares, permitiendo que esta nueva forma de energía renovable sea mucho más amigable con el medio ambiente (Figura 5).

**Figura 5** *Economía circular en el aprovechamiento RAEE paneles solares en Colombia*

*Economía circular en el aprovechamiento RAEE paneles solares en Colombia*



## 5. Conclusiones

Se pudo determinar que en Colombia se comercializan mayoritariamente paneles solares de primera generación de silicio monocristalino y policristalino. Los dos tipos de paneles dentro de su estructura física contienen un marco de aluminio, una caja de conexiones, una capa de vidrio protectora, dos capas de encapsulante EVA, una capa de células solares compuestas mayoritariamente de silicio, con conexiones de plata, aluminio, plomo y estaño. Finalmente, se presenta una capa posterior de PET que actúa como protección del panel.

Se encontró que a nivel industrial se cuentan con estrategias de reciclaje de tipo mecánica en las cuales se tritura el panel para extraer algunos de sus componentes. Del mismo modo, la investigación en las fuentes bibliográficas de la UIS permitió encontrar procesos de separación que presentan métodos mecánicos, térmicos y químicos en diferentes combinaciones con el objetivo de lograr la mejor recuperación de materiales a partir de paneles solares EoL.

A partir del análisis de distribución geográfica de las granjas solares instaladas en Colombia, se concluye que es necesario implementar un sistema descentralizado para el procesamiento de paneles solares EoL, logrando optimizar la logística en la recolección y tratamiento.

## **6. Recomendaciones**

Hacer pruebas piloto con métodos de separación térmicos y químicos encaminadas a encontrar un procedimiento estándar que permita recuperar materiales de los paneles solares EoL, con un alto grado de pureza (mayor al 95%) y efectividad, logrando el más bajo impacto ambiental, donde no se requieran procesos de refinado adicionales.

Teniendo en cuenta la matriz energética de Colombia, la cual es en su mayoría hidráulica y en una porción pequeña (pero creciente) eólica, solar y geotérmica, incentivar la creación de empresas de manufactura de paneles solares. Esto generaría una economía circular en la cual se producirían paneles solares con menores emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Referencias bibliográficas**

A. Serasu Duran & Atalay Atasu & Luk N. Van Wassenhove, 2022. "Cleaning after solar panels: applying a circular outlook to clean energy research," *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Journals, vol. 60(1), pages 211-230, January.

Akinoglu, B. G., Tuncel, B., & Badescu, V. (2021). Beyond 3rd generation solar cells and the full spectrum project. Recent advances and new emerging solar cells. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46(101287), 101287. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101287>

Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>

Azeumo, M. F., Germana, C., Ippolito, N. M., Franco, M., Luigi, P., & Settimio, S. (2019). Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 314-319.

Bogust, P., & Smith, Y. R. (2020). Physical separation and beneficiation of end-of-life photovoltaic panel materials: Utilizing temperature swings and particle shape. *JOM (Warrendale, Pa.: 1989)*, 72(7), 2615–2623. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04197-2>

Bohland, J. R., & Anisimov, I. I. (1997). Possibility of recycling silicon PV modules. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*(pp. 1173-1175). IEEE.

Chander, S., & Dhaka, M. S. (2018). CdCl<sub>2</sub> treatment concentration evolution of physical properties correlation with surface morphology of CdTe thin films for solar cells. *Materials Research Bulletin*, 97, 128-135.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Chen, W. S., Chen, Y. J., Yueh, K. C., Cheng, C. P., & Chang, T. C. (2020). Recovery of valuable metal from Photovoltaic solar cells through extraction. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 720, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.

Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., ... & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100431.

Click, N., Teknetzi, I., Tam, E. P. L., Tao, M., & Ebin, B. (2024). Innovative recycling of high purity silver from silicon solar cells by acid leaching and ultrasonication. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 270(112834), 112834. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112834>

Conoce algunos de los proyectos de energía solar en Colombia. (2022). Solmic.co. <https://www.solmic.co/panorama-de-los-proyectos-de-energia-solar-en-colombia>

Daniela-Abigail, H.-L., Tariq, R., Mekaoui, A. E., Bassam, A., Vega De Lille, M., J Ricalde, L., & Riech, I. (2022). Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. *Sustainable Cities and Society*, 77(103539), 103539. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103539>

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

Deng, R., Dias, P. R., Lunardi, M. M., & Ji, J. (2021). A sustainable chemical process to recycle end-of-life silicon solar cells. *Green Chemistry*, 23(24), 10157-10167.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Deshmukh, M. K. G., Sameeroddin, M., Abdul, D., & Abdul Sattar, M. (2023). Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1756–1759. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.501>

Dias, P., Schmidt, L., Gomes, L. B., Bettanin, A., Veit, H., & Bernardes, A. M. (2018). Recycling waste crystalline silicon photovoltaic modules by electrostatic separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 176–186. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0173-5>

Ding, M., Xu, Z., Wang, W., Wang, X., Song, Y., & Chen, D. (2016). A review on China's large-scale PV integration: Progress, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 639-652.

Dobrzański, L. A., Drygała, A., Giedroć, M., & Macek, M. (2012). Monocrystalline silicon solar cells applied in photovoltaic system. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 53(1), 7-13.

Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar energy materials and solar cells*, 67(1-4), 397-403.

Domínguez, A., & Geyer, R. (2019). Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. *Renewable Energy*, 133, 1188-1200.

Doni, A., & Dughiero, F. (2012). Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. In 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 000757-000762). IEEE.

Duran, A. S., Atasu, A., & Van Wassenhove, L. N. (2022). Cleaning after solar panels: applying a circular outlook to clean energy research. *International Journal of Production Research*, 60(1), 211–230. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1990434>

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Efaz, E. T., Rhaman, M. M., Al Imam, S., Bashar, K. L., Kabir, F., Mourtaza, M. E., ... & Mozahid, A. F. (2021). A review of primary technologies of thin-film solar cells. *Engineering Research Express*, 3(3), 032001.

El-Khawad, L., Bartkowiak, D., & Kümmerer, K. (2022). Improving the end-of-life management of solar panels in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168(112678), 112678. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112678>

Renovables, E. (2023). Estos son los diez gráficos que muestran el boom que la energía solar está experimentando en todo el mundo. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/estos-son-los-diez-graficos-que-muestran-20230614>

Farrell, C. C., Osman, A. I., Doherty, R., Saad, M., Zhang, X., Murphy, A., Harrison, J., Vennard, A. S. M., Kumaravel, V., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2020). Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128(109911), 109911. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>

Feng, Y., He, Y., Zhang, G., Wang, S., Wei, N., & Zhang, T. (2023). A promising method for the liberation and separation of solar cells from damaged crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 262(112553), 112553. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112553>

Frisson, L., Lieten, K., Bruton, T., Declercq, K., Szlufcik, J., De Moor, H., ... & Aceves, O. (2020). Recent improvements in industrial PV module recycling. In *Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 2160-2163). Routledge.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Fthenakis, V. M. (2000). End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, 28(14), 1051–1058. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(00)00091-4)

Gerold, E., & Antrekowitsch, H. (2024). Advancements and Challenges in Photovoltaic Cell Recycling: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(6), 2542.

Glover, E. (2023). How long do solar panels last? Forbes. <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/how-long-do-solar-panels-last/>

Govindaraj, & Ramasamy, P. (2023). Recycling of End of Life Photovoltaic Solar Panels and Recovery of Valuable Components: A Comprehensive Review and Experimental Validation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 111715–111715. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>

Green, M. A. (2003). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.

Gul, M., Kotak, Y., & Muneer, T. (2016). Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(4), 485-526.

Oreski, G., & Wallner, G. M. (2005). Aging mechanisms of polymeric films for PV encapsulation. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 79(6), 612–617. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.02.008>

Hansen, W., Christopher, M., & Verbuecheln, M. (2002). EU waste policies and challenges for local and regional authorities. *Capacity Building on European Community's Environmental Policy*.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Hou, X., & Baltazar, J.-C. (2023). Potential electricity production of vertical solar photovoltaic arrays. En *Springer Proceedings in Energy* (pp. 80–86). Springer Nature Switzerland.

Iakovou, E., Pistikopoulos, E. N., Walzberg, J., Iseri, F., Iseri, H., Chrisandina, N. J., Vedant, S., & Nkoutche, C. (2024). Next-generation reverse logistics networks of photovoltaic recycling: Perspectives and challenges. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 271(112329), 112329. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112329>

IRENA, G. (2020). Renewable capacity statistics 2020. *International renewable energy agency*.

Dada, M., & Popoola, P. (2023). Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00405-5>

Jawaid, M., & Khan, A. (Eds.). (2023). Conversion of electronic waste in to sustainable products. Springer Nature Singapore.

Jung, B., Park, J., Seo, D., & Park, N. (2016). Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: from noble-metal extraction to lead removal. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(8), 4079-4083.

Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., & Ryu, H. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 47, 152-159.

Kennedy, R. (2024). *Qcells, Solarcycle aim to jointly recover 95% of solar panel value*. PV Magazine. <https://www.pv-magazine.com>

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Klugmann-Radziemska, E., & Kuczyńska-Łażewska, A. (2020). The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production-A life cycle assessment of environmental impacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 205, 110259.

Lee, C. H., Hung, C. E., Tsai, S. L., Popuri, S. R., & Liao, C. H. (2013). Resource recovery of scrap silicon solar battery cell. *Waste management & research*, 31(5), 518-524.

Li, J., Ohno, T. R., & Wolden, C. A. (2016). IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).

Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., & Corkish, R. (2018). A review of recycling processes for photovoltaic modules. *Solar panels and photovoltaic materials*, 30.

Majewski, P., Al-shammari, W., Dudley, M., Jit, J., Lee, S.-H., Myoung-Kug, K., & Sung-Jim, K. (2021). Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches. *Energy Policy*, 149(112062), 112062. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>

Marija Maisch. "Huge aluminum demand expected in solar industry, concerns arise on emissions." *PV Magazine International*, 2022. <https://www.pv-magazine.com>

Marín, M. L., Jiménez, A., López, J., & Vilaplana, J. (1996). Thermal degradation of ethylene (vinyl acetate) Kinetic analysis of thermogravimetric data. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 47(1), 247-258.

Matasci, S. (2022). How Solar Panel Cost & Efficiency Change Over Time. EnergySage. Recuperado de <https://www.energysage.com/solar/solar-panel-efficiency-cost-over-time/>

Modrzynski, C., Blaesing, L., Hippmann, S., Bertau, M., Bloh, J. Z., & Weidlich, C. (2021). Electrochemical recycling of photovoltaic modules to recover metals and silicon wafers. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1851–1858. <https://doi.org/10.1002/cite.202100105>

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., & Sambou, V. (2013). Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>

Ngagoum Ndalloka, Z., Vijayakumar Nair, H., Alpert, S., & Schmid, C. (2024). Solar photovoltaic recycling strategies. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 270(112379), 112379. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112379>

NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2019 "End-of-life Management of Photovoltaic Panels: Trends and Challenges."

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). "A review of solar photovoltaic technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636.

Preet, S., & Smith, S. T. (2024). A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 448(141661), 141661. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141661>

Rangaraju, S., Isaac, O., Ghosh, A., Le Vo, P., & Bharath, S. (2021). Solar Panels Life After Death—An Overview on Solar Panel Recycling Methods and Imminent Business Opportunities. *International Journal of Multidisciplinary Research and Publications (IJMRAP)*, 1.

Ren, Y., Ueda, S., & Morita, K. (2019). Formation mechanism of ZrB<sub>2</sub> in a Si–Cu melt and its potential application for refining Si and recycling Si waste. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 7(24), 20107-20113.

ResearchGate. (2023). Marco jurídico del apoyo a las instalaciones de energía fotovoltaica en Estados Unidos: Organización administrativa e instrumentos jurídicos. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/371998528\\_Marco\\_juridico\\_del\\_apoyo\\_a\\_las\\_instalaci](https://www.researchgate.net/publication/371998528_Marco_juridico_del_apoyo_a_las_instalaci)

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

ones\_de\_energia\_fotovoltaica\_en\_Estados\_Unidos\_Organizacion\_administrativa\_e\_instrumentos\_juridicos

Romeo, A., Terheggen, M., Abou-Ras, D., Bätzner, D. L., Haug, F. J., Kälin, M., ... & Tiwari, A. N. (2004). Development of thin-film Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> and CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(2-3), 93-111.

Salim, H. K., Stewart, R. A., Sahin, O., & Dudley, M. (2019). Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. *Journal of cleaner production*, 211, 537-554.

Shin, J., Park, J., & Park, N. (2017). A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 162, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038>

Shockley, W., & Queisser, H. (2018). Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. In *Renewable energy* (pp. Vol2\_35-Vol2\_54). Routledge.

Sodhi, M., Banaszek, L., Magee, C., & Rivero-Hudec, M. (2022). Economic lifetimes of solar panels. *Procedia CIRP*, 105, 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.130>

Solarmente. (2021). ¿Sabías que la energía solar aumenta el valor de tu vivienda? Recuperado de <https://solarmente.es/blog/sabias-que-la-energia-solar-aumenta-el-valor-de-tu-vivienda/>

Sustainable Energy Initiative (SEI). (2023). Integración de la energía solar y eólica en Colombia (Informe SEI2023.016). Recuperado de <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2023/03/solar-eolica-colombia-sei2023.016.pdf>

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Tammaro, M., Salluzzo, A., Manzo, S., & Privato, C. (2014). Impatto ambientale dei rifiuti fotovoltaici. *Energia Ambiente Innovazione*, 2, 33-40.

The Eco Experts. (2024). Solar Statistics. Recuperado de Veolia. (2018). *Circular economy: recycling photovoltaic panels*. Veolia. <https://www.veolia.com/en/our-media/news/circular-economy-recycling-photovoltaic-panels>

Verlinden, P. J. (2020). Future challenges for photovoltaic manufacturing at the terawatt level. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(5).

Vinayagamoorthi, R., Bhargav, P. B., Ahmed, N., Balaji, C., Aravinth, K., Krishnan, A., Govindaraj, R., & Ramasamy, P. (2024). Recycling of end of life photovoltaic solar panels and recovery of valuable components: A comprehensive review and experimental validation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111715. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111715>

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

Zuser, A., & Rechberger, H. (2011). "Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics." *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 56-65.

## Apéndices

### **Apéndice A Normativa Vigente para el tratamiento de los RAEE de Paneles Solares PV en el mundo**

El incremento en el uso de la energía solar Fotovoltaica (PV) ha contribuido de manera significativa al aumento sostenido de las aplicaciones de energías renovables en todo el mundo. A pesar de que aún continúa el reinado de las energías fósiles, se espera que en los próximos 30 años la tendencia cambie drásticamente hacia energías renovables (Majewski, P. 2021).

Con una cantidad total de 580 Giga vatios (GW) instalados, la cantidad de paneles usados es asombrosa. La vida útil de los paneles es de 25 a 30 años según indican los fabricantes (El-Khawad, L. 2022), sin embargo, se ha podido evidenciar (como se muestra más arriba en este documento) que factores climáticos, mecánicos, tecnológicos y económicos hacen que el tiempo de utilización de los paneles se reduzca dramáticamente hasta 3 años de vida por generación (Duran, 2021).

El gran reto para los gobiernos es implementar una regulación que sea clara con miras a una economía circular para el mercado de los paneles, la cual involucre a fabricantes, distribuidores, consumidores y empresas de reciclaje; de tal modo que el problema que se avecina con los desechos de paneles PV se convierta en una oportunidad de aprovechamiento de materias primas para lograr esta economía circular que pretenden las naciones (Majewski, P. 2021).

En 2019 se tenía una potencia instalada de 580 GW (IRENA, 2020) con una distribución promedio de 35,3% en China, 19% en la Unión Europea, 11,8% en Estados Unidos, 10,6% en Japón y 6% en India. Se puede estimar con esto que se tienen un número muy cercano a los dos mil millones de paneles en funcionamiento y solamente en la Unión Europea (UE) (Majewski, P.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

2021) se tendrán 43.500 toneladas de residuos, tan pronto estos paneles PV salgan de funcionamiento (Fthenakis, V. M. 2000)

Algunas de las causas para el reemplazo temprano (antes de finalizar su vida útil) de paneles son: eventos climáticos severos, desastres naturales, incendios en edificios, altas tasas de instalaciones de paneles de baja calidad, incentivos financieros para el cambio temprano, falta de mantenimiento y penetración de humedad, ubicaciones e instalaciones inapropiadas y daños durante el transporte e instalación (Majewski, P. 2021).

La opción más favorecida en términos de residuos es la prevención (no producirlos), seguido por la consigna “reducir, reutilizar y reciclar”. Sin embargo, en el caso de los paneles PV, prevención y reducción no están dentro de las opciones ya que el auge de las energías renovables obliga al uso de cada vez más cantidad de paneles PV (Hansen, W. 2022).

Siendo el reciclaje de paneles PV la mejor opción en términos de medio ambiente, se empiezan a gestar las condiciones para que una nueva y emergente industria florezca en este campo. Dicho mercado tendría un valor de 450 millones de dólares para 2030 y de 15 mil millones de dólares para 2050 (Weckend, S. 2016. Domínguez, A. 2019), pero se deben superar barreras como la falta de políticas, restricciones financieras, capacidad de infraestructura y mercados finales (Domínguez, A. 2019. Salim, H. K. 2019). Es urgente que se implementen sistemas y regulaciones claras para la recolección, almacenamiento y tratamiento de los residuos de paneles PV, antes de que el tema se convierta en un problema medio ambiental de grandes proporciones (Majewski, P. 2021).

Debido a que la energía solar PV es una industria emergente, no se cuenta con datos recientes de estudios, con lo cual se advierte al lector que los datos presentados a continuación tienen corte al año 2020 y en la actualidad (año 2024), parte de la información expuesta en este

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

documento, podría haber tenido cambios gracias a nuevas legislaciones que se pudieran aprobar. Se tuvieron en cuenta seis (6) países/regiones los cuales son los más importante en términos de capacidad de generación fotovoltaica instalada.

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en EU y el Reino Unido**

Para 2019 la cifra de capacidad fotovoltaica rondaba los 138 GW con un promedio de 70 a 80 toneladas de paneles por cada Megavatio (MG) instalado (Tammaro, M. 2014). En 2020 se esperaba 33.000 toneladas de unidades instaladas, se prevé 133.000 para 2030 y 4 y 9,5 millones para 2040 y 2050 respectivamente (Weckend, S. 2016). Europa ha empezado a desarrollar formas y conceptos para el reciclaje desde las fábricas mismas, entregando políticas cada vez más claras y estrictas a la industria involucrada. La UE ya cuenta con regulaciones para el reciclaje de paneles PV y desde 2003 se desarrollan regulaciones que incluyen la Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) y la restricción de materiales peligrosos (RoHS). El sistema RoHS restringe y controla el uso de ciertos materiales, mientras que la directiva WEEE gestiona la recolección, tratamiento y eliminación de productos, a la vez que impone restricciones en el diseño para facilitar el tratamiento de final de vida EoL (End o Life). Adicional, según la legislación RAEE, las empresas que ingresan nuevos productos en la UE, son legalmente responsables por la gestión EoL de dichos productos, sin importar su sitio de fabricación.

La directiva WEEE indicaba que el 75%/65% (tasa de recuperación/reciclaje) de los paneles PV en masa debía ser reciclada hasta 2016; en 2018 aumentaba al 80%/75% y de ahí en adelante 85%/80%. Las tecnologías de reciclaje actuales cumplen con los requisitos RAEE actuales, pero se requiere investigación y desarrollo para cumplir con las reglamentaciones futuras.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Para los desechos electrónicos de consumidores privados, el fabricante debe depositar una cantidad de fondos para el tratamiento del equipo luego de su vida útil en un sistema conocido como Regulación de Empresa a Consumidor B2C. La misma reglamentación, pero de empresas a empresas se conoce como B2B. Actualmente esta normativa cubre casi el 90% de todos los residuos electrónicos; sin embargo, con la masificación de los parques solares FV se espera que la regulación B2B tome mayor importancia para cubrir esta nueva ola de desechos por paneles solares (Majewski, P. 2021).

En octubre de 2015 la Directiva RAEE de la UE se transfirió al derecho Aleman en virtud de la Ley de Aparatos eléctricos y electrónicos (Elektroaltgerätegesetz o ElektroG), se especifican legislaciones para la recolección y reciclaje de paneles solares PV y cada proveedor debe proporcionar seguridad financiera por panel vendido que garantice su tratamiento EoL.

También en el Reino Unido a partir de 2014 se instaló la Directiva RAEE. Todos los productores de paneles deben estar registrados y cumplir con el esquema B2B. Para el Reino Unido los paneles reciclados no representen gran valor, tal modo que se espera exportarlos a algún país de la UE que tenga consolidada su industria para el tratamiento EoL. De momento las instalaciones allí cumplen con los requisitos de la British Processing Facility.

La mayoría de las empresas en la UE apoyan el tratamiento EoL para los paneles PV. En 2007 se fundó una empresa en Europa para reciclaje de celular solares la cual tiene puntos de recogida, logística de transporte y socios de reciclaje específicos distribuidos en toda la zona.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en Estados Unidos**

Estados Unidos es el cuarto mercado en generación de energía solar PV, con un estimado de 68 GB instalados. Actualmente se calculan entre 6500 y 24000 toneladas y se esperan 1 millón en 2030 y hasta 10 millones de toneladas para 2050 (IRENA, 2020).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) domina las regulaciones federales y aunque no existe una regulación especial para los residuos solares, empresas como Solar World y First Solar apoyan la valorización total del producto. Los residuos de paneles PV se tratan según la Ley de Recuperación y Conservación de Recursos (RCRA), pero cada estado introduce sus propias leyes para la regulación del reciclaje de paneles PV.

Washington da el primer paso con la Ley de Empleo de Incentivos Solares (ESSB 5939), que exige a los fabricantes de paneles solares financiar la recolección y procesamiento del módulo PV en su EoL. En California se permite que los desechos de paneles PV sean exportados a otros países que podrían no tener infraestructura para procesarlos.

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en China**

China es el mayor mercado de energía solar PV con 205 GB instalados en 2020 (IRENA, 2020), también son el mayor fabricante de paneles del mundo. Esto prevé un problema importante de residuos que asciende hasta los 20 millones de toneladas en 2050. Han desarrollado su propia política de reciclaje de RAEE a través del Instituto de Ingeniería de la Academia Nacional de Ciencias. A partir de 2011 el reglamento exige que los residuos electrónicos sean recogidos de varias maneras, como que los productores lo hagan, o tengan centros de recolección de terceros. Sin embargo, los paneles PV no son considerados RAEE y por tanto no existe una legislación vigente al respecto (Weckend, S. 2016).

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

El gobierno, consciente de esta problemática, ha financiado la investigación y el desarrollo en el marco del Programa Nacional de Investigación y Desarrollo de Alta Tecnología de China para el Reciclaje de Fotovoltaicos y la Investigación de Eliminación de Seguridad (2012-15) para métodos de reciclaje de c-Si a través de reciclaje físico y térmico (Weckend, S. 2016. Ding, M. 2016)

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en Japón**

Japón es líder en el desarrollo e investigación de paneles FV, con empresas productoras reconocidas a nivel mundial. Actualmente cuenta con 62 GW instalados (IRENA. 2020) y se espera que los residuos acumulados alcancen 1 millón de toneladas en 2030 y 7,6 millones en 2050 (Weckend, S. 2016). No posee actualmente regulaciones específicas para el reciclaje de paneles PV y se acogen a lo enumerado en la Ley de Gestión de Residuos y Purificación Pública. En 2013 el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) y el Ministerio de Medio Ambiente (MOE) desarrollaron una base legislativa para el tratamiento EoL de equipos de energías renovables, pero de momento no existen programas específicos y se toma la regulación de residuos industriales. Entre 2013 y 2019 se han llevado a cabo algunos proyectos de reciclaje de paneles FV en coordinación con la Organización para el Desarrollo de Nuevas Energías y Tecnología Industrial (NEDO) (Majewski, P. 2021).

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en India**

India está en el ranking del mercado fotovoltaico con una capacidad instalada de 35 GW en 2019 (IRENA. 2020), para 2022 se esperaba que tuviera 100 GW en sistemas fotovoltaicos conectados, a través de la Misión Solar Nacional Jawaharlal Nehru (JNNSM). También JNNSM planea instalar 2 GW de energía solar PV sin conexión a la red (Off-Grid). En este sentido se espera que para 2050 tengan 7,5 millones de toneladas de residuos de paneles PV.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

India tiene una infraestructura sólida para el reciclaje de RAEE pero no existe una regulación especial para paneles PV, su tratamiento está incluido en la Ley General de Residuos. Todo es controlado y gestionado por el Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático en concordancia con las Normas de Gestión de Residuos Sólidos de 2016 y las Normas de Desechos Peligrosos y Otros (Gestión y Movimientos Transfronterizos).

### **Regulación de reciclaje de paneles PV en Australia**

Los sistemas fotovoltaicos en Australia presentan récord de penetración en el mercado con una participación en 2019 de 7,1 GW en instalaciones residenciales (<10 kW), 1,8 GW en instalaciones comerciales (10-100 kW) y 4 GW en servicios públicos (>100 kW), con una capacidad total de 12,9 GW. Australia espera tener más de 100.000 toneladas de desechos de paneles PV en 2035.

En junio de 2016, el Ministerio Federal del Medio Ambiente, incluyó los sistemas fotovoltaicos en la lista de productos prioritarios de acuerdo con la sección 108A de la Ley de Gestión de Productos de 2011. En 2019 los paneles PV se incluyeron en el Plan de Acción de Política Nacional de Residuos con el objetivo de tener un esquema de gestión de productos establecido hasta 2023.

Se está investigando por la industria, opciones para paneles solares y sus accesorios en su EoL. Se evalúa las vías voluntarias, correguladores y obligatorias de gestión de productos; así mismo se está identificando el alcance del producto y el enfoque de gestión a elegir.

El reciclaje de paneles solares será esencial para que en el futuro se pueda seguir considerando esta energía como “limpia” y se puedan brindar soluciones a largo plazo que beneficien a la comunidad internacional.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

En la actualidad solamente la UE y el Reino Unido cuentan con legislaciones claras para el reciclaje de paneles solares, hace falta un gran camino de investigación y desarrollo. Sin embargo, el hecho que de todas las naciones reconocen los paneles solares como RAEE, muestra un camino que se irá unificando en los años siguientes.

En Colombia aún no se cuenta con legislación ni centros de reciclaje específicos para RAEE de paneles solares PV, sin embargo, se empieza a mirar con gran atención casos importantes como el de la UE, para adoptar políticas claras que se acoplen a reglamentaciones internacionales en este mismo sentido.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

### Apéndice B Paneles Solares de Segunda y Tercera Generación

Los paneles solares fotovoltaicos han evolucionado más allá de la tecnología de silicio cristalino de primera generación, con el desarrollo de la segunda y tercera generación de paneles. Los paneles de segunda generación, que incluyen tecnologías de película delgada como CdTe y CIGS, ofrecen una alternativa más económica y flexible al reducir el uso de materiales semiconductores y permitir la producción en superficies no tradicionales. Por otro lado, la tercera generación introduce innovaciones radicales con materiales como perovskitas y células solares orgánicas, buscando no solo aumentar la eficiencia, sino también reducir los costos de fabricación y expandir las aplicaciones potenciales, incluyendo la integración en edificios y dispositivos móviles (Al-Ezzi, A. S. 2022) (Jamroen, C. 2023).

#### Paneles Solares de Segunda generación

Aquí se agrupan paneles solares de película delgada más económicos que las de silicio de primera generación. El espesor de las capas generalmente es inferior a 1 micrómetro( $\mu\text{m}$ ), lo que reduce el consumo de materiales y el costo del panel.

Se tienen 5 tipos principales de paneles de segunda generación:

**Paneles de Telurio de Cadmio (CdTe):** Están compuestos de una capa de telurio de cadmio sobre un sustrato de vidrio o metal. Son populares debido a su bajo costo de producción y su capacidad para absorber una amplia gama de longitudes de onda de luz. Su eficiencia teórica es del 29% y en condiciones de laboratorio han alcanzado eficiencias del 22.1% (Chander, S. 2018). Algunas de sus ventajas son, el bajo costo de producción, buena eficiencia en condiciones de baja irradiancia y menor uso de material. Como desventajas se tienen que el cadmio es tóxico y puede representar un riesgo ambiental si no se maneja adecuadamente. Este tipo de paneles es ideal para grandes instalaciones solares en áreas con alta radiación solar.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Paneles de Seleniuro de Cobre, Indio y Galio (CIGS):** Consisten en una capa de CIGS depositada sobre un sustrato flexible o rígido. La tecnología CIGS permite fabricar paneles ligeros y flexibles. Han demostrado una eficiencia de conversión de energía del 19.2% en laboratorio (Romeo, A. 2024). Poseen gran flexibilidad, alto coeficiente de absorción de luz, adecuado para superficies irregulares. Sin embargo, su producción es más costosa que CdTe, y se tiene una disponibilidad limitada de indio y galio (elementos esenciales en su fabricación). Se pueden usar en edificios *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), techos y superficies curvas. (Romeo, A. 2004)

**Paneles de Silicio Amorfo (a-Si):** Utilizan silicio en su forma no cristalina, depositado en capas delgadas sobre un sustrato. Son los más baratos de fabricar entre los paneles de segunda generación. Su eficiencia es menor que otros tipos de paneles de segunda generación, generalmente entre 6% y 10%. Son muy económicos, tienen buena respuesta a la luz difusa, y son muy flexibles. Poseen menor eficiencia energética y se degradan más rápido en comparación con otros tipos de paneles. Estos paneles son usados principalmente en calculadoras solares, dispositivos portátiles y aplicaciones de baja potencia.

**Paneles de Cobre, Indio, Selenio (CIS):** Similares a los CIGS, pero sin el uso de galio. Están compuestos de capas de cobre, indio y selenio. Poseen una eficiencia menor que los paneles CIGS, pero con eficiencias en el rango de 12% a 14%. Su costo de producción es menor debido a la ausencia de galio y poseen buena absorción de luz. Pueden ser usados en techos solares, integración en edificios e instalaciones en áreas urbanas.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

**Paneles de Arseniuro de Galio (GaAs):** Utilizan arseniuro de galio como material base, conocido por su alta eficiencia y resistencia a la radiación. Su eficiencia es superior al 25% en condiciones ideales. Tienen excelente rendimiento en altas temperaturas y resistencia a la radiación. Como punto débil presentan un costo de fabricación muy elevado y uso de materiales tóxicos. Entre sus principales aplicaciones se tienen Satélites, aplicaciones espaciales y entornos extremos.

### **Paneles Solares de Tercera Generación**

Son nuevas tecnologías desarrolladas en combinación con generaciones anteriores de paneles solares que aún no se producen a escala industrial. La mayoría son células en tándem (Micromorph, arseniuro de galio), perovskita y células solares sensibilizadas con colorantes.

Las **células solares de perovskita** son una tecnología revolucionaria debido a sus propiedades excepcionales de absorción de luz y facilidad de fabricación. Este tipo de células se puede mezclar con las de silicio para producir células tándem, aumentando su eficiencia. Presentan degradación temprana por factores medioambientales y contiene elementos tóxicos.

Las **células solares orgánicas (OPV)** están compuestas de polímeros y pequeñas moléculas orgánicas. Se producen fácilmente mediante procesos basados en soluciones, su producción es económica y presentan menor huella de carbono en comparación con las células inorgánicas. Se viene investigando su integración con materiales de construcción, telas y ventanas; electrónica portátil y tecnología vestible (*weareables*).

**Células solares sensibilizadas por colorantes (DSSC)**, utilizan tintes fotosensibles para transformar la luz solar en energía eléctrica, presentando buen rendimiento en condiciones de baja luminosidad.

## PROTOCOLO GESTIÓN RAEE PANELES SOLARES EN COLOMBIA

Las **Células solares de puntos cuánticos**, se fabrican con nanopartículas semiconductoras que puede capturar un espectro de luz más amplio en comparación con los materiales solares tradicionales. Presentan gran potencial en aumento de eficiencia energética de los paneles existentes y poseen la capacidad para ajustar las propiedades ópticas y electrónicas mediante la manipulación del tamaño y la composición de los puntos cuánticos.

Las **células solares de múltiples capas** son fabricadas con múltiples capas de semiconductores los cuales capturan de manera independiente cada espectro de luz. Son muy útiles en zonas de energía solar concentrada y en el espacio (Shockley, W. 2018) (Akinoglu, B. G. 2021).

En general los paneles de tercera generación representan el futuro de la tecnología solar, ofreciendo soluciones innovadoras que podrían superar las limitaciones de las generaciones anteriores en términos de eficiencia y costos. Sin embargo, aún enfrentan desafíos significativos que deben ser abordados antes de que puedan ser adoptados ampliamente en el mercado.