

Tecnologías y Métodos para Reciclaje de Materiales de Paneles Fotovoltaicos Basados en Silicio  
Cristalino

Angie Zuleyma Casas Rueda

Brayant Miguel Cordero Castellanos

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Dra. En Ciencias Físicas

Codirector

Cesar Antonio Duarte Gualdrón

Dr. En Ingeniería Eléctrica y Computación

Universidad Industrial de Santander

Facultad Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bucaramanga

2023

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios principalmente por haberme permitido culminar con éxito esta etapa tan importante de mi formación profesional, por haberme otorgado una familia tan maravillosa quienes han creído en mí siempre, que con su amor y apoyo han contribuido a la consecución de este logro.

A mis padres por ser mi ejemplo de superación y apoyo incondicional en todo momento, por la paciencia y confianza que depositaron en mí.

A mi amada hija María Victoria por ser mi sostén, mi fuerza y fuente de motivación e inspiración para superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depara un mejor futuro.

A mi esposo Diego mi compañero de vida, por la motivación a diario y aun cuando no confiaba en mis capacidades, por su amor, dedicación y entrega en nuestro hogar.

A mi hermana Liseth por sus palabras, compañía y apoyo en los cuidados de mi hija cuando lo necesitaba.

A mi nonita Rosalbina mi ángel, por la protección y oraciones que en vida hizo por mí, sé que estaba orgullosa de su nieta y ahora que en cielo se encuentra es mi compañía constante.

A mis directores de proyecto Mónica y Cesar por el apoyo en el desarrollo del proyecto de grado.

*Angie Zuleyma Casas Rueda*

### **Agradecimientos**

A Dios por guiar mi camino.

A mis padres Nelly Adriana Castellanos y Miguel Cordero por su entrega, lucha y valentía para apoyarme incondicionalmente.

A mi hermano Daniel Cordero por su compañía y lealtad.

A mi tío Sergio Castellanos y mi abuela Nelly Sanmiguel por motivarme a continuar en los momentos que sentí desfallecer.

Finalmente, una mención especial a mi abuela Carmen Díaz, mi abuelo Miguel Cordero Sandoval, mi primo Andersson Reyes, y mi tía Margarita Cordero quienes fueron mis maestros de vida y siempre creyeron firmemente en mí.

*Brayant Miguel Cordero Castellanos*

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Revisión de Tecnologías y Metodologías Existentes.....	15
2.1 Generalidades del Panel Fotovoltaico de Silicio Cristalino.....	15
2.2 Estructura de los Paneles Fotovoltaicos de Silicio Cristalino.....	16
2.3 Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos .....	18
2.3.1 Métodos mecánicos.....	19
2.3.2 Métodos Térmicos .....	24
2.3.3 Métodos Químicos.....	28
2.3.4 Métodos Combinados .....	32
3. Criterios Comparativos .....	34
4. Selección de la Metodología y Adaptación de al Mercado Colombiano.....	45
4.1 Unidad Funcional.....	45
4.2 Selección de Panel Fotovoltaico Modelo.....	45
4.3 Selección de la Metodología de Reciclaje de los Paneles Fotovoltaico EOL.....	47
4.4 Capacidad Fotovoltaica Instalada en Colombia.....	52
4.5 Distribución Weibull.....	53
4.6 Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Futuro .....	55
4.7 Adaptación al Mercado Colombiano del Proceso FRELP.....	58

RECUPERACIÓN DE MATERIALES DE PANELES FOTOVOLTAICOS	5
4.7.1 Consumo Energético por Etapas del Proceso FRELP .....	58
4.7 Análisis de Rendimiento del Proceso FRELP .....	59
5. Conclusiones.....	63
Referencias.....	65
Apéndices.....	73

**Tabla de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Estructura de Panel Fotovoltaico Basado en Silicio Cristalino y Celda Solar.</i> .....	17
Figura 2. <i>Esquema de Procesos Empleando Métodos Mecánicos para Reciclaje de Materiales en Paneles Fotovoltaicos EOL.</i> .....	24
Figura 3. <i>Esquema de Proceso Empleando Métodos Térmicos para Reciclaje de Materiales en Paneles Fotovoltaicos EOL.</i> .....	27
Figura 4. <i>Esquema de Proceso Empleando Métodos Químicos para el Reciclaje de Materiales en los Paneles Fotovoltaicos EOL.</i> .....	31
Figura 5. <i>Esquema de Proceso Empleando Métodos Combinados para el Reciclaje de Materiales en los Paneles Fotovoltaicos EOL.</i> .....	34
Figura 6. <i>Descripción de la Metodología Seleccionada</i> .....	50
Figura 7. <i>Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Escenario de Pérdidas Tempranas, Empleando la Función Distribución de Weibull</i> .....	56
Figura 8. <i>Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Escenario de Perdidas Regulares, Empleando la Función Distribución de Weibull</i> .....	57
Figura 9. <i>Resumen de Costos Operativos, Obtenidos en la Plataforma del Ministerio de Transporte</i> .....	61

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Composición de Capas en Módulos Fotovoltaicos</i> .....	18
Tabla 2. <i>Materiales Recuperados, Ventajas, Desventajas y Costos de los Diferentes Métodos de Reciclaje</i> .....	36
Tabla 3. <i>Unidad Funcional (Una Tonelada de Paneles Fotovoltaicos EOL) para un Panel Fotovoltaico Modelo de 550 [Wp]</i> .....	46
Tabla 4. <i>Flujo de Materiales en el Modelo FRELP de Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos EOL</i> 51	
Tabla 5. <i>Capacidad Instalada de Proyectos Solares Fotovoltaicos desde el 2012-2023</i> .....	53
Tabla 6. <i>Parámetros Empleados para la Función de Distribución de Weibull</i> .....	55
Tabla 7. <i>Consumo Energético del Proceso FRELP</i> .....	58
Tabla 8. <i>Costos Directos para Reciclaje de una Unidad Funcional</i> .....	61
Tabla 9. <i>Composición en Peso de Paneles Fotovoltaicos EOL y Valor del Material Reciclado</i> .	62

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Ficha técnica de panel solar seleccionado JA SOLAE 550 WP referencia JAM72S30.

Apéndice B. Tarifario de energía eléctrica del operador de red ENEL para enero de 2023

Apéndice C. Tarifario de Acueducto y Alcantarillado Bogotá para enero de 2023.

Apéndice D. Costos detallados de transporte calculados por el SICE-TAC

### Glosario

EDS: Espectropía de rayos X por dispersión de energía

EOL: Etapa final de vida de los paneles solares que se requiere reciclar.

EVA: Etilvinilacetato es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo.

FNCER: Fuentes no convencionales de energía renovable

FRELP: Recuperación completa al final de su vida útil fotovoltaica.

ICP-AES: Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente

PET: Polietilentereftalato

PFTE: Politetrafluoroetileno

PVF: Polifluoruro de vinilo, también conocido como Tedlar.

PVDF: Fluoruro de polivinilideno

N.R: No reporta información sobre el tema

SEM: Microscopía Electrónica de Barrido

TGA: Análisis termogravimétrico

T.R: Tasa de recuperación

UPME: Unidad de planeación minero energética

XRD: Difracción de rayos x

XRF: Fluorescencia de rayos X

### Resumen

**Título:** Tecnologías y Métodos para Reciclaje de Materiales de Paneles Fotovoltaicos Basados en Silicio Cristalino\*.

**Autor:** Angie Zuleyma Casas Rueda, Brayant Miguel Cordero Castellanos\*\*

**Palabras Clave:** Reciclaje, c-Si, paneles, EOL.

**Descripción:**

El presente caso de estudio se orienta en la selección de una metodología de reciclaje de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino (c-Si) EOL aplicable a escala industrial, desarrollando una propuesta de adaptación al mercado colombiano, que presenta una alta demanda proyectada en los próximos 20 años, esta estimación se logra por medio de los dos escenarios asociados a pérdidas que se presenta comúnmente en la literatura y se modela empleando la distribución de Weibull. Esta metodología se determina realizando una comparación de alternativas existentes. La metodología se enfoca en la recuperación de materiales como el vidrio, silicio (Si), cobre (Cu), plata (Ag) y aluminio (Al) con una combinación de enfoques como mecánico, térmico y químico para lograr una alta recuperación de materiales y metales que conforman los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino EOL.

A partir de la descripción de energía requerida en cada paso del método FRELP se logra cuantificar los costos de operación en el proceso para un usuario de tipo sector industrial colombiano, así como también se logra relacionar la cantidad de material recuperado en el proceso de reciclaje; esto representa un punto de partida para saber la viabilidad de la implementación en Colombia con el fin de reducir los impactos ambientales que se producen al final de la vida útil del panel fotovoltaico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Directora: Mónica Andrea Botero Londoño, Dra. En Ciencias Físicas. Codirector: Cesar Antonio Duarte Gualdrón, Dr. En Ingeniería Eléctrica e Informática

**Abstract**

Title: Technologies and methods for the recycling of materials from photovoltaic panels based on crystalline silicon\*

**Author:** Angie Zuleyma Casas Rueda, Brayant Miguel Cordero Castellanos.\*\*

**Keywords:** Recycling, c-Si, panels, EOL.

**Description:**

The present case study is oriented to the selection of a methodology for recycling of crystalline silicon photovoltaic panels (c-Si) EOL which is applicable to industrial scale, developing a proposal of adaptation to the Colombian market, which presents a high demand projected in the next 20 years, this estimation is achieved by means of the two scenarios associated to losses that is commonly presented in the literature and is modeled using the Weibull distribution. This methodology is determined by performing a comparison of existing alternatives. The methodology focuses on the recovery of materials such as glass, silicon (Si), copper (Cu), silver (Ag) and aluminum (Al) with a combination of mechanical, thermal, and chemical approaches to achieve a high recovery of materials and metals that make up the EOL crystalline silicon photovoltaic panels.

From the description of energy required in each step of the FRELP method, it is possible to quantify the operating costs in the process for a Colombian industrial sector type user, as well as to relate the amount of material recovered in the recycling process; this represents a starting point to know the feasibility of the implementation in Colombia in order to reduce the environmental impacts that occur at the end of the useful life of the photovoltaic panel.

---

\* Degree work

\*\* Physical-Mechanical Faculty. School of Electrical and Electronic Engineering. Director: Mónica Andrea Botero Londoño, PhD in Physical Sciences. Co-director: Cesar Antonio Duarte Gualdrón, PhD in Electrical and Computer Engineering

## Introducción

La energía solar fotovoltaica es una tecnología en expansión a nivel mundial, su implementación permite la descarbonización de la matriz de generación del sector eléctrico. Se espera que en el año 2030 cerca de 65% de la energía consumida sea suministrada por fuentes renovables de energía, entre estas, la energía solar fotovoltaica con una capacidad instalada de 5200 [GW]. (IRENA, 2022). Colombia, en particular, apunta hacia una transición energética con participación mayoritaria de las de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), promoviendo la ejecución de proyectos en materia de energía renovable. Enfatizando este hecho, el gobierno estableció la Ley 1715 de 2014, donde incentiva mediante beneficios tributarios los proyectos de generación solar fotovoltaica e incluso permite la venta de excedentes al sistema energético nacional. (Castaño Gómez & García Rendón, 2020). Siguiendo esta ruta, en Colombia se ha instalado en los últimos diez años alrededor de 55,9 [GW] en proyectos fotovoltaicos, y la tendencia ha evidenciado un crecimiento en nuevos proyectos radicados año tras año en los registros de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia, UPME (UPME, 2023). En contraste con los beneficios de la energía solar fotovoltaica, los altos volúmenes de desechos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil (entre 25 y 30 años), traerá problemas ambientales en el futuro relacionados con contaminación de suelos, emisión de gases contaminantes, y alteraciones en el ciclo del agua. Estos problemas se presentan desde dos frentes: la presencia de paneles fotovoltaicos End Of Life, EOL (paneles fotovoltaicos en el final de su vida útil) en el ambiente, y el impacto de manufactura de nuevos paneles fotovoltaicos en la industria. En el primer caso, el transporte de grandes volúmenes de paneles fotovoltaicos a vertederos, produce contaminación acústica y del aire, una vez en sitio,

los componentes tóxicos como el plomo (Pb), cadmio (Cd), estaño (Sn), cobre (Cu) y Silicio (Si), entran en contacto con los suelos, filtrando partículas contaminantes en la tierra y aguas subterráneas (Sultan Busra, y otros, 2023). En el segundo, caso, la fabricación de nuevos paneles fotovoltaicos, especialmente en el proceso de la celda solar, se ocupa productos químicos que afectan la salud de los trabajadores, como el amoníaco ( $\text{HN}_3$ ) usado para producir la capa anti reflectante, puede provocar irritaciones en la piel, problemas en los pulmones, estómago y garganta. El ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) empleado para limpieza de reactores, es altamente inflamable. Además, el ácido hidrolórico, usado para la limpieza de semiconductores, puede causar infecciones respiratorias y ópticas. Por las razones expuestas anteriormente, es conveniente implementar un eficiente reciclaje de paneles solares que permitan recuperar materiales valiosos y mitigar problemas ambientales. (Sultan Busra, y otros, 2023). Los métodos actuales de reciclaje de paneles fotovoltaicos, se clasifican según su enfoque: mecánico. Térmico, químico y combinados. Estos métodos se encuentran en constante avance en función de maximizar su rendimiento en cuanto a la tasa de recuperación de materiales valiosos y disminución de costos y efectos contaminantes. Con la recuperación de materiales de alta pureza es posible facilitar en mayor medida, la construcción de nuevos paneles fotovoltaicos con la misma composición de los módulos iniciales (Mulazzani, Eleftheriadis, & Leva, 2022).

El presente caso de estudio, realiza una revisión de la literatura relacionada al reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL, relacionando resultados de rendimiento tales como tasa de recuperación (TR), costos de proceso, ventajas y desventajas, destacando el rendimiento a gran escala del método Full Recovery End Of Life Photovoltaic (FRELP) y seleccionándolo como base de un escenario adecuado para implementar el reciclaje de paneles solares EOL en Colombia.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Desarrollar una metodología para el reciclaje de vidrio, silicio de grado metalúrgico y metales a partir de paneles fotovoltaicos basados en silicio cristalino.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar una síntesis de las diferentes tecnologías y métodos para el reciclaje de materiales valiosos (silicio de grado metalúrgico, vidrio y metales) de paneles fotovoltaicos basados en silicio cristalino a partir de un análisis de la literatura del estado del arte.

Realizar un análisis comparativo para identificar costos, desempeño, ventajas y desventajas de los diferentes métodos y tecnologías estudiadas.

Seleccionar una metodología que permita obtener silicio de grado metalúrgico, vidrio y metales a partir de paneles fotovoltaicos de silicio (Si) y adaptarla al mercado colombiano.

## **2. Revisión de Tecnologías y Metodologías Existentes**

Este capítulo presenta la descripción de las tecnologías y metodologías existentes para la recuperación de materiales valiosos de los paneles fotovoltaicos EOL de silicio cristalino tales como Si de grado metalúrgico, Cu, Ag, Al y caja de conexiones, por medio de los diferentes métodos existentes como: mecánico, térmico, químico y combinados encontrados en la literatura.

### **2.1 Generalidades del Panel Fotovoltaico de Silicio Cristalino**

La composición física de los paneles fotovoltaicos debe tenerse en cuenta, como punto de partida para desarrollar un tratamiento adecuado de residuos de paneles fotovoltaicos (Weckend, Wade, & Heath, 2016). Un panel fotovoltaico es un módulo, que está ensamblado en forma de sándwich, por capas paralelas de diferentes materiales (Rong, Yuting, & Yansong, 2022). Las celdas solares que transforman la radiación en voltaje directo, son generalmente clasificadas en celdas basadas en silicio cristalino y celdas basadas en semiconductores compuestos. Los sistemas basados en silicio cristalino destacan por su alta eficiencia llegando incluso al 25% en la tasa de conversión de energía solar en energía eléctrica (Soowon, y otros, 2021). La cuota de mercado se refiere a la porción que abarca cierta tecnología de paneles fotovoltaicos, del total consumido en el comercio. (Domínguez & Geyer, 2017). Para el caso de la tecnología de silicio cristalino, la cuota de mercado establecida es de 82%, presentada por (Weckend, Wade, & Heath, 2016) para paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos comercializados a partir de 2020.

Las celdas solares son el componente de generación de los paneles fotovoltaicos. Tienen un espesor cercano a los 200 [µm]. El corazón de la celda solar es la oblea de silicio (Si)

cristalino, dopada con boro y fósforo para formar una unión de semiconductores PN. Los electrones de la oblea de silicio (Si) absorben la irradiación solar y mediante procesos de difusión y arrastre se genera una corriente eléctrica debido al efecto fotovoltaico y por tanto una diferencia de potencial entre los bornes de la celda.

Una capa anti reflectante mejora la incidencia de la radiación solar, es fabricada principalmente con monóxido de silicio (SiO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), nitrato de silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022). Los costos de producción de las celdas solares representan un 60% del costo de producción de los paneles fotovoltaicos y a su vez la oblea de silicio (Si) cristalino representa el 65% del costo de producción de cada celda (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022).

Un factor a tener en cuenta, es que las celdas solares están interconectadas entre sí mediante un arreglo de barras metálicas. Las barras delgadas denominadas “dedos” contienen una cantidad minoritaria de plata (Ag) (metal valioso con baja disponibilidad en el mundo), y transportan electrones hacia barras más gruesas fabricadas en cobre denominadas “buses” que acumulan los electrones y los transmiten en forma de corriente hacia la celda solar contigua, mediante tiras de cobre, de esta forma se obtiene un arreglo de celdas en serie. Cuando se conectan estos arreglos en paralelo a otros arreglos en forma de string, se obtiene el panel fotovoltaico (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022).

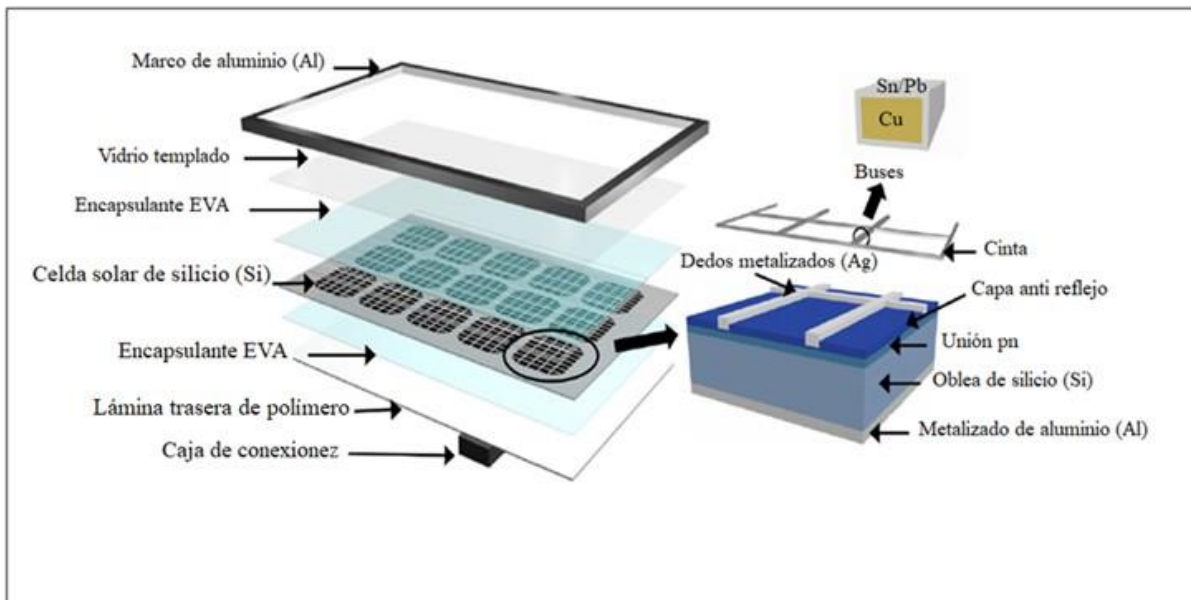
## **2.2 Estructura de los Paneles Fotovoltaicos de Silicio Cristalino**

La estructura más común de los paneles fotovoltaicos basados en silicio(Si) cristalino, consta de un marco de aluminio(Al) sellado con silicona, una caja de conexiones con conductores de cobre(Cu), una lámina de vidrio, celdas solares de silicio(Si) conectadas con cintas de cobre (Cu) y una base soldada compuesta de plomo (Pb); dos hojas transparentes de encapsulante EVA, y

una lámina trasera de polímero que actúa como soporte y está elaborada con la mezcla de tres polímeros: EVA, PET y Tedlar o PVDF (ver figura 1) (Dias, Javimczik, Benevit, & Veit, 2017). Desde un punto de vista económico, el mayor interés de los métodos de reciclaje es recuperar en mayor medida, la oblea de Si, metales y en una segunda instancia, vidrio y polímeros (Weckend, Wade, & Heath, 2016). La composición física de las capas de un panel fotovoltaico y los materiales valiosos para el reciclaje se presenta en la tabla 1.

**Figura 1.**

*Estructura de Panel Fotovoltaico Basado en Silicio Cristalino y Celda Solar.*



*Nota:* Adaptada de (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022)

**Tabla 1.***Composición de Capas de los paneles Fotovoltaicos.*

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de peso en un panel fotovoltaico (%)</b>	<b>Valor económico relativo</b>	<b>¿Interés de reciclado?</b>
Silicio (Si)	2-3	Alto	Si
Plata (Ag)	0.006~0.08	Alto	Si
Cobre (Cu)	4.4~7	Alto	Si
Aluminio (Al)	10~20	Medio	Si
Vidrio	69~75	Bajo	Si
Caja de conexiones	2	Bajo	Si
Polímeros (EVA, PVF)	7	-	No
Boro(B)	<0.1	-	No
Fósforo (P)	<0.1	-	No
Plomo (Pb)	<0.1	-	No
Dióxido de estaño	<0.1	-	No

*Nota:* Adaptada de (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong , Lingling, & Chunxiang, 2022)

### **2.3 Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos**

Desde una perspectiva económica, el reciclaje de bajo rendimiento recupera materiales desgastados de bajo valor y pureza marco de Al, trozos de vidrio con baja transmitancia óptica), mientras el reciclaje de alto rendimiento (objeto de interés en el presente caso de estudio), obtiene materiales tratados de mayor valor y pureza (Rong, Nathan, Chang, Zi Ouyang, & Chee

Mung Chong, 2019). Para ello, han desarrollado diferentes tecnologías sobre los paneles fotovoltaicos EOL, las cuales presentan diferentes métodos, y se diferencian entre sí, tanto en los materiales como en la proporción y pureza obtenidos. Los métodos se clasifican comúnmente en mecánicos, térmicos, químicos, y combinaciones de estos (Byungjo, Jongsung, Donghwan, & Nochang, 2016). Un factor común para los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL, es que se inicia con un desmontaje manual, donde se retira el marco de Al y la caja de conexiones. (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022), quedando una superposición de vidrio, encapsulante EVA superior, lámina Si, encapsulante EVA posterior y lámina trasera de polímero, a lo que se referirá de aquí en adelante como estructura fotovoltaica. Las generalidades de los métodos aplicados posterior al desmontaje, se presentan a continuación:

### ***2.3.1 Métodos mecánicos***

Estos métodos buscan separar los principales materiales que componen los paneles fotovoltaicos, con esto se logra una alta recuperación de material por masa de panel fotovoltaico EOL, aunque los materiales pequeños y más valiosos no se recuperan por completo (Weckend, Wade, & Heath, 2016). Los procesos mecánicos incluyen trituración, tamizado y separación de metales (A., T., P., & P.S, 2023). (Pagnanelli, y otros, 2017)

La trituración y tamizado de la estructura fotovoltaica, son opciones comunes a la hora de reciclar los componentes de esta (Granata, Pagnanelli, Moscardini, Havlik, & Toro, 2014) desarrollaron reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL, aplicando dos métodos mecánicos y evaluando la relación de calidad y cualidad de material reciclado para ambos casos. Se toma muestras de 2 [kg] de estructura fotovoltaica como insumo del método se realiza doble trituración iniciando con máquinas rotativas de doble pala (DR120/360 Slovakia), y continuando en una trituradora (SK 600, Slovakia). Mediante tamizado se filtra las muestras con un diámetro

de calibre [5mm], a continuación, es necesario emplear un horno industrial, configurado a 650 °C durante una hora con el propósito de eliminar el encapsulante EVA de las celdas solares. Se replica este proceso aplicando cinco diferentes calibres en el tamizado, (8 mm, 5mm, 1 mm 0.4 mm y 0.08mm) y en un agitador automático, luego se pesan. Mediante este análisis de tamizado se evalúa el tamaño, flujo de masa y la distribución de producto en cada caso. Se descarta las fracciones con calibre menor a 1mm mientras, las fracciones mayores a este calibre son empleadas como insumo para el tratamiento térmico posterior. Del tratamiento térmico se obtienen muestras con un calibre menor a un (1) milímetro a las cuales se les aplican un análisis mediante Difracción de rayos X (XRD) y Fluorescencia de rayos X (XRF) para obtener su composición química. Los resultados indican que la recuperación de vidrio en una mayor masa de material se produce con partículas mayores a 0.08 mm por el bajo contenido de impurezas (encapsulante EVA y metales). El método presenta los mejores resultados cuando se siguen cuatro pasos: trituración empleando máquina con rotor de dos palas, trituración de martillo, tratamiento térmico de fracciones con calibre mayor a 1mm y finalmente tamizado con calibre igual a 0.08mm. Con esta secuencia de pasos se puede recuperar cerca del 85% de la masa del panel fotovoltaico EOL en forma de vidrio, mientras, las partículas menores a 0.08 contienen porcentajes de metales que pueden ser insumos de un tratamiento posterior de reciclaje enfocado en dichos componentes.

A continuación, se presenta otro proceso desarrollado por (Bai-Peng, y otros, 2020) donde se expone el método denominado High Voltaje Fragmentación (HVF) que proporciona una manera sencilla de liberar los metales de los minerales. La estructura fotovoltaica se corta en piezas de 3x3 cm y son introducidos en un contenedor triturador hasta llenar su capacidad de 1L.

La muestra de estructura fotovoltaica es sometida a pulsos de alto voltaje, que generan altas temperaturas y presiones internas en los materiales, en consecuencia, se quiebran.

Los pulsos de alto voltaje son generados por una máquina SELFRAG AG, la estructura fotovoltaica se posiciona entre dos electrodos y se le realiza una descarga eléctrica con un voltaje pico de 160 [kV], una cantidad de 300 pulsos y un consumo energético de 192.99 J/g. Una vez realizadas las descargas, los productos se someten a un horno de secado a 80°C durante 20 horas, luego son clasificados en ocho grupos en función de su tamaño. Seguidamente se utiliza un Espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, NexION™ 350D, PerkinElmer, USA) que sirve para determinar la concentración de metales en las fracciones obtenidas, donde la mayor proporción de metales se concentra en las fracciones menores a un (1) mm.

Este método representa menos desperdicio de material y mejores resultados de trituración, además no produce emisiones contaminantes como lo hacen los métodos convencionales de desmantelamiento, también se tiene una separación selectiva de materiales, ya que los metales se separan y concentran en fracciones de determinado tamaño. Por otro lado, se presentan restricciones en cuanto a las características del generador de pulsos, en adición a los procesos accesorios de calentamiento y secado, dificultando la reproducción del método a gran escala. Este método requiere métodos accesorios para la separación de los metales concentrados, tal cual como se muestra a continuación.

Se trata de la investigación de (Akimoto, Iizuka, & Shibata, 2018) donde la estructura fotovoltaica cortada en muestras de 50mm x50 mm, es el medio de descarga para un generador de pulsos SELFRAG 2.0 en cuatro muestras, variando el voltaje pico entre 90 y 120[kV], la distancia entre electrodos de 10 a 20 mm, manteniendo constante la frecuencia 5[Hz] y la

cantidad de pulsos, igual a 20. Analizando el impacto de las descargas en las muestras se configura un segundo triturado electrostático con tres muestras variando el voltaje pico entre 90 - 180 [kV], y manteniendo fija tanto la distancia de 10 mm entre los electrodos, la frecuencia de 5[Hz] y la cantidad de pulsos igual a 400. Después de estas dos trituraciones, se tamizan las muestras a través de 11 calibres de tamiz, y se filtra el encapsulante EVA no diluido, con un filtro Politetrafluoroetileno (PFTE). A continuación, se determina mediante un estudio de Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) la cantidad de masa de elementos concentrada en las fracciones tamizadas. Se emplea un método accesorio de separación por densidades, sumergiendo las fracciones tamizadas en una solución 2.4- 3 g/cm<sup>3</sup> de politungstato de sodio y agua destilada con el fin de separar los productos livianos y pesados desde la solución, para finalmente analizarlos con ICP-AES. Este estudio es determinante en la recuperación de vidrio, silicio (Si) y metales, sin embargo, los métodos mecánicos para el reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL pueden adaptarse en función de otros requerimientos, presentados a continuación.

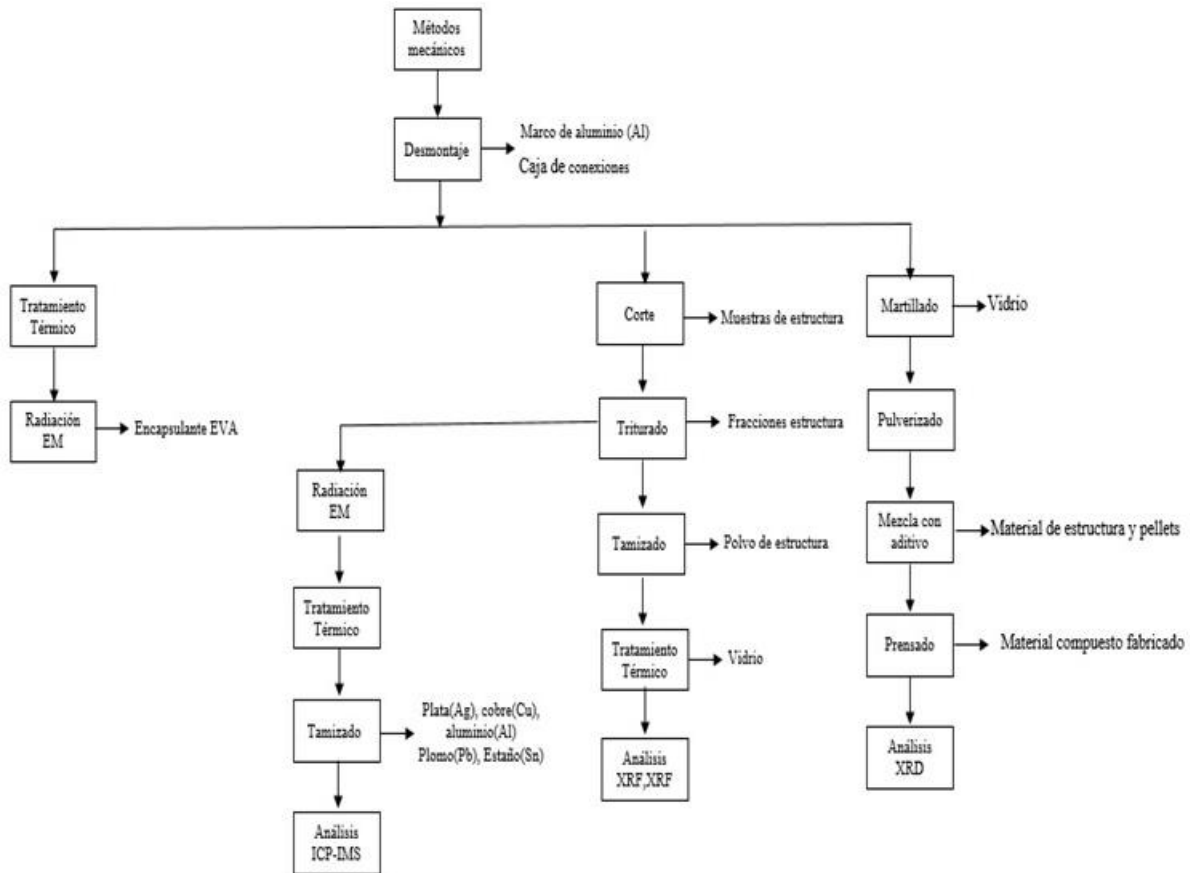
Según (Dias, Javimczik, Benevit, & Veit, 2017) la separación del encapsulante EVA, es uno de los pasos más complicados para la separación de materiales de los paneles fotovoltaicos. Para la separación del encapsulante EVA, (Xiaotong, Huan, Jiachuan , Hongwei , & Lei, 2022) sugiere que pueden aplicarse métodos mecánicos, ya que, a pesar de su bajo costo, si el encapsulante EVA es reciclado efectivamente, puede evitarse el uso de agentes disolventes orgánicos que reaccionan con el polímero y generan emisiones contaminantes. Para ello, se calienta la capa trasera de la estructura fotovoltaica con una pistola de calor a 500 °C, la cual debilita la fuerza de adhesión de la capa trasera de polímero hacia el módulo y puede separarse manualmente. La estructura fotovoltaica (a la cual se le retira la lámina trasera de polímero) se

irradia desde la parte trasera con un láser de fibra óptica de 1064 [nm], con una amplitud de pulso de 4[ns] y un punto de láser de 35 [ $\mu\text{m}$ ]. El láser consume una potencia de 20[W], correspondiente a una densidad de potencia máxima de 2.1 [ $\text{MW}/\text{cm}^2$ ] sobre la superficie, los metales absorben esta radiación sin alterar su composición química y propiedades físicas (esto es confirmado con SEM y EDS); la temperatura generada permite separar la unión entre el encapsulante EVA con la lámina solar, así, después de la irradiación, es posible despegar el encapsulante EVA manualmente.

También existen diferentes enfoques de los métodos mecánicos en el reciclado y disposición final de materiales obtenidos (Weckend, Wade, & Heath, 2016). Por ejemplo, (Kokul & Bhowmik, 2021) proponen un método basado en la pulverización de la estructura fotovoltaica para crear materiales rígidos compuestos. Es posible extraer el vidrio templado de los paneles fotovoltaicos EOL mediante martillado, el cual constituye alrededor del 70% del peso de estos y se recupera en un 90%, finalmente es posible separarlo. La estructura fotovoltaica se somete a un pulverizador, y posteriormente se mezcla con pellets de polipropileno reciclado dentro de una prensa de moldeo por compresión a 140 °C y presión variable de 20 a 40 [MPa], produciendo seis baldosas de material compuesto, por cada panel fotovoltaico EOL, las cuales pueden usarse en diferentes aplicaciones que requieran rigidez, basados en los ensayos de tracción del estándar internacional ASTM D638 tipo 1 (Kokul & Bhowmik, 2021). Un esquema de procesos consolidado, de los métodos mecánicos presentados, se muestra en la figura 2.

**Figura 2.**

*Esquema de Procesos Empleando Métodos Mecánicos para Reciclaje de Materiales en Paneles Fotovoltaicos EOL.*



**2.3.2 Métodos Térmicos**

Los métodos con tratamiento térmico son adecuados para recuperar el encapsulante EVA y la lámina trasera de polímero. (Teng-Yu, Jui-Chung, & Chen-Hsun, 2012). Los métodos térmicos representan una alternativa destacable en comparación con los métodos químicos, en materia de costos y medio ambiente (Ruixue & Zhenming, 2014). Para ejemplificar lo anterior, (Riech, y otros, 2021) propone una metodología la cual comienza con la estructura fotovoltaica cortada en piezas de 10x10 cm<sup>2</sup>. Se utiliza una lámpara halógena (Argos 9400450) para suavizar el encapsulante EVA y facilitar la separación manual del vidrio quebrado desde la estructura

fotovoltaica. Al alcanzar temperaturas comprendidas entre 90 y 150°C, la estructura fotovoltaica (a la cual se le retira el vidrio), se torna flexible y se puede separar la lámina trasera de polímero mediante raspado. Como secuencia, se emplea un horno industrial (Barnstead Thermolyne F6020C) configurado a 550°C durante una hora para lograr la combustión completa del encapsulante EVA.

Un método alternativo es la pirólisis, según (de Marco, y otros, 2008) es una técnica que separa la materia orgánica volátil (gases, polímeros), de la inorgánica (vidrio, metales), mediante un aumento en la temperatura del material, en ausencia de oxígeno. La materia inorgánica permanece sin cambios durante todo el proceso; de esta forma pueden recuperarse y reutilizarse materiales valiosos. En la investigación de (Dias, Javimczik, Benevit, & Veit, 2017) se mejora la técnica de pirólisis para el proceso de recuperación de materiales de paneles fotovoltaicos EOL. Se emplea una lupa y un estilete para separar la lámina trasera de polímero desde la estructura fotovoltaica. La lámina trasera de polímero es removida manualmente y se le aplica un análisis FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy), para identificar los polímeros presentes en su composición. El encapsulante EVA posterior es removido para hacerle un estudio Termogravimétrico (TGA), este suceso es importante para definir los parámetros de operación de la segunda pirólisis. Seguidamente se emplea un molino de cuchillos SRB 2305 donde se pulveriza las muestras de estructura fotovoltaica en cuatro ocasiones, usando dos aperturas para el molino: 4mm y 2mm. De este paso se obtiene un pulverizado de 4[kg], el cual se empaqueta en muestras de 300 [g] y se tamiza en un agitador electrónico durante 15 minutos con un calibre de tamizado de 1mm y se obtiene tres tipos de fracción: F1 la cual tiene un tamaño menor a 0.5mm. F2 con un tamaño entre 0.5 y 1 mm. F3 con tamaño mayor a 1mm. A continuación, se desarrolla la pirólisis tomando 9 g de muestra de cada tipo de fracción, en un horno industrial

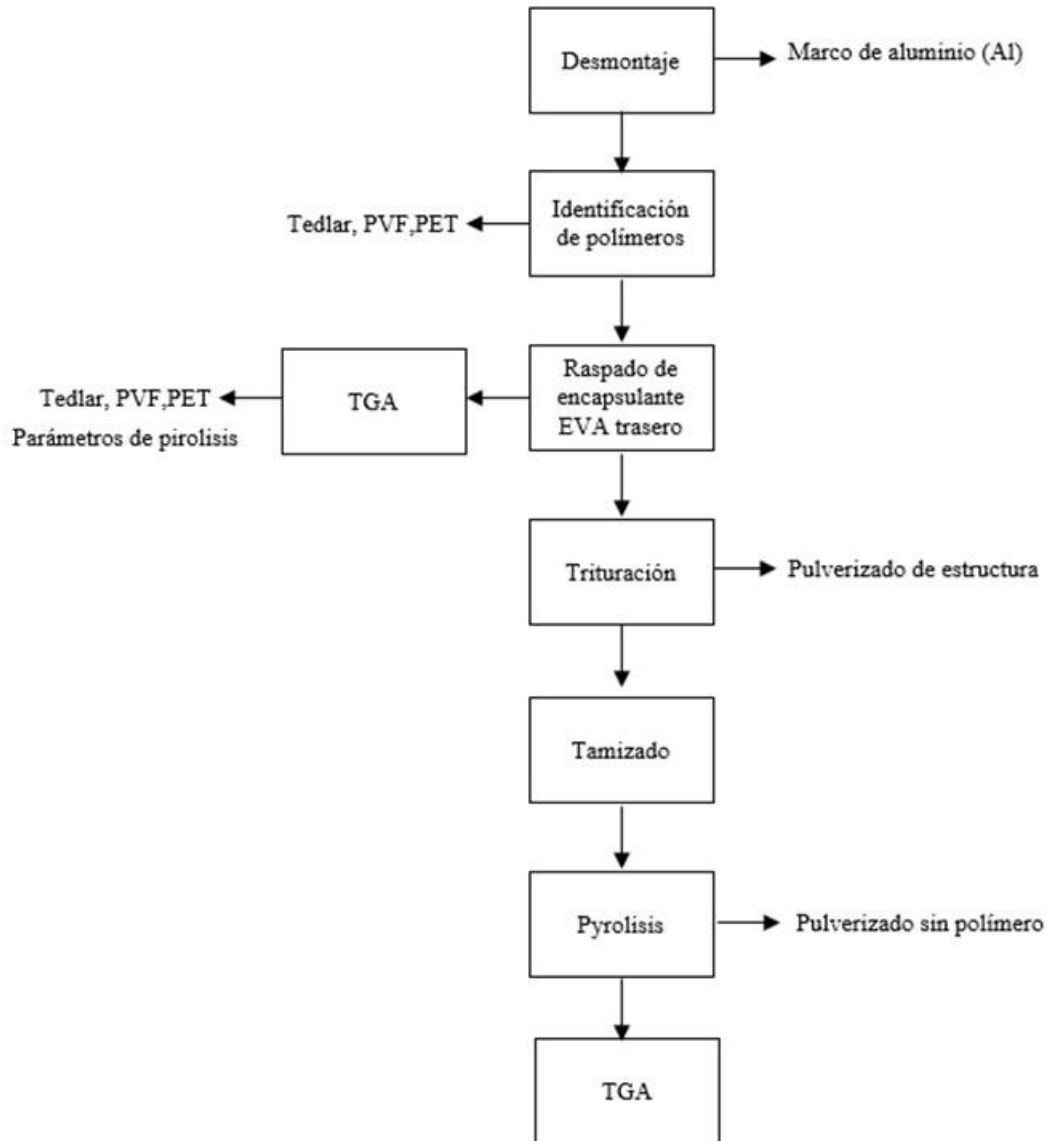
con los siguientes parámetros, obtenidos del TGA: 500°C, razón de cambio de 15°/min, flujo de Nitrógeno(N) de 1L/min, establecidos durante 20, 30, 60 y 180 minutos. Seguidamente se realiza un segundo TGA en las muestras después de la pirólisis para determinar la cantidad de material recuperado. Los resultados evidencian que se puede recuperar cerca del 93.55% del peso de la muestra pulverizada inicial, al remover los polímeros que están presentes en esta, y alrededor del 99% al configurar la pirólisis con los parámetros obtenidos en el primer TGA.

La pirólisis genera productos de fluoruro de hidrógeno (HF), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos volátiles y compuestos orgánicos fluorados debido a la combustión de la lámina trasera de polímero. Estos productos se dispersan por el ambiente, atentando directamente contra la salud humana y el ecosistema (Barker & Kasprzak, 1993). Actualmente, los investigadores trabajan en soluciones para mitigar este impacto, tal es el caso de (Fiandra, Sannino, Concetta, & Graditi, 2019) en cuyo estudio propone una pirólisis constituida por dos pasos: El primero es el precalentamiento, donde se somete una muestra de estructura fotovoltaica de 10x10cm a una temperatura de 200°C en ausencia de flujo de gases durante media hora, esto permite retirar la lámina trasera de polímero y ablandar el encapsulante EVA. El segundo paso consta de un tratamiento térmico a una tasa de 450°C/h en un reactor tubular al cual se le suministra una mezcla de oxígeno(O) y nitrógeno(N) a un caudal de 24L/h, hasta fijar la temperatura en 500°C por una hora. Los polímeros con bajo punto de ebullición que se degradan, se arrastran por la corriente de gas y se recolectan en los recipientes del reactor, mientras los que tienen alto punto de ebullición se enfrían, condensan y captan en los tubos flexibles. Para recuperar los materiales de la estructura fotovoltaica sometida a tratamiento térmico, se emplea tamizado, obteniendo vidrio, Si y Cu.

En la figura 3 se presenta un diagrama de procesos de los métodos térmicos expuestos anteriormente.

**Figura 3.**

*Esquema de Proceso Empleando Métodos Térmicos para Reciclaje de Materiales en Paneles Fotovoltaicos EOL.*



### ***2.3.3 Métodos Químicos***

Seguidamente del desmontaje de la caja de conexiones y marco de aluminio, se puede disolver el encapsulante EVA con solventes orgánico o inorgánicos, con el fin de recuperar obleas de Si completas de los paneles fotovoltaicos EOL (Xu et al., 2021). Diversas investigaciones han empleado una gran variedad de solventes como: diclorobenceno (O-DCB), tricloroetileno (TCE), benceno, tolueno, hexano, tetrahidrofurano y cloroformo (Chen et al., 2019; Kim & Lee, 2012). Sin embargo, los solventes orgánicos en algunas oportunidades no diluyen por completo el encapsulante EVA, por tanto, se necesita un tratamiento adicional como la pirólisis (Deng et al., 2022). Investigaciones estudian los métodos de estrategias químicas que evalúan la concentración, la temperatura, el tiempo, clase de reactivo, la solubilización en la separación de los componentes y la recuperación de las obleas de silicio (Si) con el fin de encontrar un tiempo adecuado, más amigable con el medio ambiente y eficiente en la recuperación de materiales (Dias et al., 2016; Tammara et al., 2015).

Algunas investigaciones proponen métodos térmicos y químicos para la recuperación de Si donde la estructura fotovoltaica se coloca en un horno y mediante tratamiento térmico se separan las capas de esta. Seguidamente se sumerge en ácido nítrico y luego en hidróxido de potasio para extraer Ag y Al respectivamente (Shin et al., 2017), el método térmico se lleva a cabo en dos etapas, en la primera etapa la capa trasera de polímero se separa de la estructura fotovoltaica a 330°C durante 30 minutos, el segundo paso del calentamiento se lleva a cabo para calcinar el encapsulante EVA a 400°C durante 120 minutos con el fin de recuperar la placa de vidrio sin romperse (T. Y. Wang et al., 2012). Algunos estudios han usado irradiación ultrasónica en varios solventes orgánicos (Kim & Lee, 2012a). Estos estudios se aplican debido a

que los tratamientos térmicos liberan componentes peligrosos por la degradación térmica completa del encapsulante EVA (Tammamaro et al., 2015)

El procedimiento de clasificación de materiales es uno de los pasos claves que permiten un procesamiento de alto rendimiento. En los estudios emplean diferentes procesos como la separación por densidad o separación gravimétrica, que permite obtener Ag y Cu (Savvilotidou & Gidarakos, 2020), también existen procesos como el grabado químico que permite la recuperación de obleas de Si de alta pureza (Dias et al., 2016; X. Wang et al., 2022).

Seguidamente de la clasificación de materiales, la lixiviación es un método que se aplica a la fragmentación rica en metales, con el fin de disolver los componentes valiosos para luego extraer los metales. Adicionalmente este proceso permite obtener plata (Ag), cobre (Cu) y aluminio (Al) de un alto grado de pureza (Latunussa et al., 2016; Savvilotidou & Gidarakos, 2020; X. Wang et al., 2022), sin embargo, la lixiviación libera sustancias peligrosas que deben tener un tratamiento especial adicional ((Latunussa et al., 2016).

Algunas investigaciones utilizan una solución de lixiviación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) para disolver gránulos Ag, Sn, Cu y plomo Pb. El estaño (Sn) se precipita como dióxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) y se puede recuperar por sedimentación o filtración. Adicionalmente la solución de lixiviación se pasa por electroobtención para recuperar los metales restantes, la tasa de recuperación Ag es de 74% y Cu de 83%; sin embargo, durante el proceso de lixiviación se producen gases tóxicos como el dióxido de nitrógeno, lo que dificulta su recuperación (W. H. Huang et al., 2016). Se ha encontrado que el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) tiene una mayor eficiencia en la lixiviación de Al y Ag que el hidróxido de sodio (NaOH) (Luo et al., 2021). También emplean el proceso de precipitación de plata (Ag) utilizando ácido clorhídrico (HCl). Como consecuencia se obtiene polvo de plata (Ag) de alta pureza con una recuperación global del 96.03%, en estos

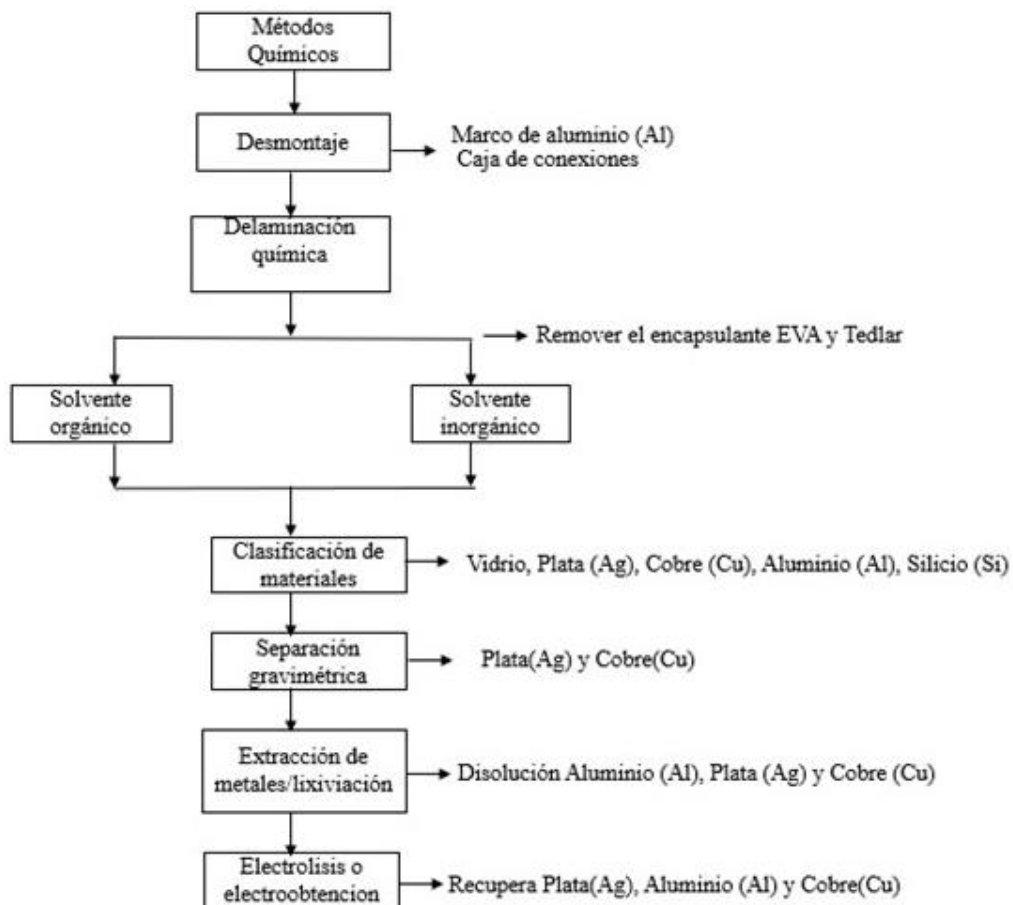
procesos se reutiliza el ácido en nuevas lixiviaciones con el fin de minimizar el líquido de desecho y desperdicio. Los resultados muestran que después de 2 usos la solución ya no puede lixiviar las celdas solares (Luo et al., 2021). Otras investigaciones utilizan tolueno y hexano para la obtención de celdas de silicio(Si), arrojando como resultado que el hexano en presencia de ultrasonicación durante 15 minutos obtiene el 92.4% del desprendimiento de las celdas solares de silicio (Si) intactas en 24 h; por el contrario, al utilizar tolueno como disolvente da como resultado la fractura completa de las celdas solares (F. C. Huang et al., 2021), también estudios han empleado solventes orgánicos como benceno, tricloroetileno (TCE), tolueno. O-diclorobenceno (O-DCB) con irradiación ultrasónica tipo sonda para la disolución del encapsulante EVA, y establece que en presencia de 450 [W] de irradiación, el O-diclorobenceno (O-DCB) en condiciones favorables durante 30 minutos, ocasiona la disolución completa del encapsulante EVA y ninguna grieta en las obleas de silicio mientras que el resto de solventes orgánicos originan grietas en las obleas(Kim & Lee, 2012b), investigaciones adicionales como (Dias et al., 2021) notifica la separación completa de los componentes del panel fotovoltaico EOL después de sumergirlo en tolueno a presión atmosférica durante 99 h.

Las microondas, las temperaturas elevadas, los pretratamientos de trituración, el dióxido de carbono(CO<sub>2</sub>) supercrítico logran aumentar la solubilidad y apresurar la delaminación química desde unos días hasta unas mínimas horas (Deng et al., 2022). Estudios recientes usan microondas para acelerar la disolución del encapsulante EVA en varios solventes orgánicos concluyendo que en tricloroetileno a 70°C en 2 h ,logra una separación completa, aunque la mayoría de los solventes orgánicos como el tricloroetileno, tolueno, benceno entre otros son muy peligrosos en el cuerpo humano en un ambiente abierto debido a su toxicidad y volatilidad, en especial a elevadas temperaturas lo cual puede ser perjudicial para el cuerpo si está en contacto

directo, estos experimentos se llevan a cabo en campanas de humo o contenedores herméticos, seguidamente se llevan a un método de condensación para reciclar los solventes orgánicos (Pang et al., 2021). Investigaciones en comparación con otros reactivos, utilizan una solución de KOH-etanol que es un reactivo verde con baja toxicidad ambiental que en condiciones favorables logra la separación completa de los paneles fotovoltaicos EOL en 3 h con temperatura del reactor de 200°C y con una concentración de 0.2 mol/L, la (T.R) de obleas de Si es de 96.27% (Yan et al., 2020). En la figura 4 se detalla el proceso de reciclaje empleando métodos químicos.

**Figura 4.**

*Esquema de Proceso Empleando Métodos Químicos para el Reciclaje de Materiales en los Paneles Fotovoltaicos EOL*



### ***2.3.4 Métodos Combinados***

En el método combinado se consideran los tres procesos fundamentales de reciclaje: método mecánico, método térmico y método químico, que se entrelazan entre sí para obtener un proceso final más eficiente en la restauración de los materiales.

La primera etapa consta de cortar los bordes del marco Al, seguidamente se rasga el marco de Al restante, luego se transfiere a un proceso donde un brazo mecánico separa los cables de los residuos fotovoltaicos obteniendo como resultado: los cables, caja de conexiones y marco de Al, separados de las celdas fotovoltaicas, vidrio y polímeros (Latunussa et al., 2016), sucesivamente, se puede emplear el proceso de un separador de marcos desarrollado por NPC Incorporated (Doi, 2021), el paso a seguir es el de retirar la lámina trasera de polímero y el encapsulante EVA. Seguidamente mediante el proceso de pirólisis que se lleva a cabo a 400°C, se descomponen los polímeros y separa la capa de vidrio y las celdas solares (Duflou et al., 2018a; Latunussa et al., 2016), sucesivamente algunas investigaciones usan un láser pulsado de fibra óptica para irradiar la celda solar desde la parte posterior, de modo que se separa fácilmente el encapsulante EVA y la celda solar mecánicamente (Li et al., 2022), de igual manera algunas investigaciones emplean procesos físico-mecánico, donde inicialmente, se trituran los módulos luego se separan con procesos de molienda, tamizado y medios pesados (Azeumo et al., 2019). Luego utilizan lixiviación en ácidos como nítrico (HNO<sub>3</sub>), clorhídrico (HCl) y sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para disolver metales que permiten la recuperación de plata (Ag) y Cobre (Cu) de las celdas solares (Duflou et al., 2018a) seguidamente utilizan la electroobtención para recuperar el resto de metales de la lixiviación (W. H. Huang et al., 2017) Alternativamente, investigaciones usan el grabado químico que elimina los revestimientos como el antirreflectantes (ARC) y metálicos, y las capas de difusión para la obtención de Si (Klugmann-Radziemska, 2013).

Investigaciones con un proceso de reciclaje integrado emplean varios enfoques como la separación mecánica selectiva, tratamiento térmico y químico. Inicialmente, separan el marco de aluminio y la caja de conexiones seguidamente se lleva a cabo un proceso de pirólisis a 400°C para disolver el encapsulante EVA y la lámina trasera de polímero, para liberar la capa de vidrio y las celdas solares. Seguidamente se lleva a un proceso químico con ácido nítrico (HN03) que permite la recuperación de plata (Ag) y cobre (Cu), y se logra recuperar 98% de vidrio, 86% de aluminio (Al) y 95% de plata (Ag) y cobre (Cu) respectivamente (Duflou et al., 2018b).

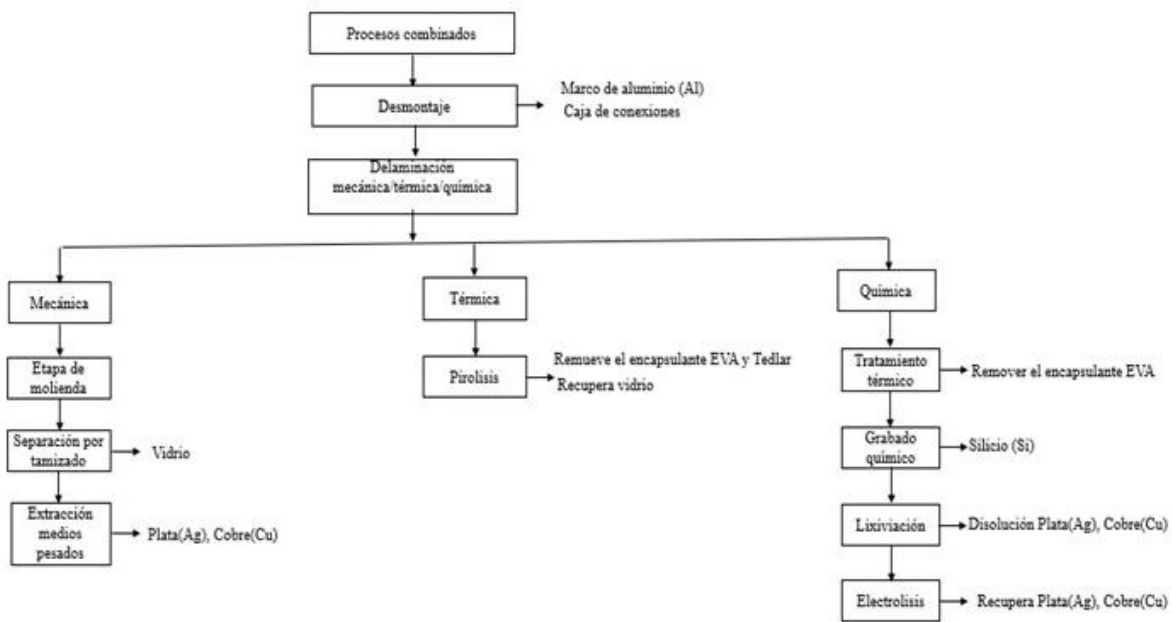
Investigación como el proyecto FRELP “Recuperación completa al final de su vida útil fotovoltaica” emplea un proceso integrado eficiente donde inicialmente una máquina retira el marco de aluminio y caja de conexiones de los paneles fotovoltaicos EOL, luego la lámina se calienta a 90-120°C para recuperar el vidrio, seguidamente se calienta a 500°C para la disolución del encapsulante EVA y la lámina posterior de polímero. El gas residual de la incineración de los polímeros se recicla para la combustión, posteriormente las celdas de silicio Si se graban con ácido nítrico (NHO<sub>3</sub>) para recuperar Si, posteriormente se llevan a tratamientos de electrólisis con hidróxido de calcio (CaOH<sub>2</sub>) para recuperar plata Ag y Cu. Los residuos de la electrólisis se neutralizan y se filtran (Ardente et al., 2019). Alternativamente, investigaciones como el proyecto ReSiELP emplean un proceso sobresaliente en la recuperación de materiales valiosos contenidos en los paneles fotovoltaicos EOL. Inicialmente se desmonta el marco de aluminio del panel fotovoltaico, seguidamente se corta y se reduce el tamaño de la estructura fotovoltaica para ingresarlo al horno, seguidamente se lleva a un proceso térmico donde se elimina el encapsulante EVA y la lámina trasera de polímero. Posteriormente, se lleva a un proceso de separación que permite recuperar materiales como el vidrio, celdas solares y cintas de electrodos (Cu).

Adicionalmente se lleva a un proceso químico para recuperar Al, Si y Ag (Feldmann et al., 2019).

En la figura 5 se detalla el proceso de reciclaje empleando métodos combinados.

**Figura 5.**

*Esquema de Proceso Empleando Métodos Combinados para el Reciclaje de Materiales en los Paneles Fotovoltaicos EOL.*



### 3. Criterios Comparativos

Como se detalló en el capítulo 2, el proceso mecánico involucra procesos de separación física, caracterizado por la disminución del tamaño de partícula a través de procesos trituración y delaminación principalmente (Kokul & Bhowmik, 2021) y, en menor medida, uso de pulsos eléctricos para separar las partes de los paneles fotovoltaicos EOL. Mientras el proceso térmico involucra procesos de transferencia de calor caracterizados por la separación de las capas

poliméricas (EVA, PVF) por acción del calor y, organización de materia orgánica e inorgánica a través del proceso de delaminación térmica y pirólisis [Dobra et al., 2022,]. Sin embargo, cabe resaltar que este proceso se combina con otros (principalmente el químico) debido a que por sí solo, no es eficiente en la separación completa de las obleas de silicio y de los metales más relevantes (Al, Cu, y Ag). Paralelamente el proceso químico involucra procesos de transformación química caracterizados por la remoción de las capas poliméricas (encapsulante EVA, lamina trasera de polímero) y, separación de los metales de interés a través de procesos de grabado químico y lixiviación principalmente (donde se usa solventes orgánicos y ácidos) (Kim & Lee, 2012) y, en menor medida, uso de ultrasonido para separar las capas poliméricas de los equipos fotovoltaicos. En favor de mejorar resultados, el proceso combinado involucra los tres procesos anteriores (mecánico, térmico y químico) que, combinando las mejores características entre sí, permiten una recuperación mayor de las obleas de silicio y los metales más importantes (Al, Cu y Ag). Dentro del proceso combinado, se caracterizan procesos de delaminación, trituración, lixiviación, grabado químico, pirólisis y filtración al vacío para separar cada parte funcional y no funcional del panel fotovoltaico EOL.

En la tabla 2 se observa un resumen sobre los diferentes métodos existentes del reciclaje de materiales de paneles fotovoltaicos EOL, su porcentaje de recuperación (%), ventajas, desventajas y costos según reportados en la literatura.

**Tabla 2.**

*Materiales Recuperados, Ventajas, Desventajas y Costos de los Diferentes Métodos de Reciclaje*

Tipo	Metodología	Materiales			
		recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
mecánicos	(Granata, Pagnanelli, Moscardini, Havlik, & Toro, 2014)	Marco. Caja de conexiones. Vidrio 85%	Alto desempeño de recuperación de vidrio de alta pureza	Se descartan otros materiales de interés como los metales y el silicio.  Emisiones contaminantes en la combustión de encapsulante EVA.	Consumo de energía de Triturador doble rotor, (DR120/360, Slovakia), martillo triturador (SK 600, Slovakia) y horno resistivo durante una hora por cada 2 kg de estructura fotovoltaica
	(Bai-Peng, y otros, 2020)	Marco. Caja de conexiones. Fragmentos de partículas compuestas por Cu, Al, Ag, Sn, y Pb sin separar.	Mejores resultados de trituración (los metales se concentran en determinados	Condiciones puntuales del generador de pulsos. Escala de laboratorio. Requiere métodos	<b>Costos totales: NR</b> 0.056 KWh/kg es decir 1.6016 KWh por panel fotovoltaico EOL y 56.056kWh por unidad funcional

Tipo	Metodología	Materiales recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
			fragmentos de la estructura fotovoltaica triturada electrostática mente) con menos uso de equipo	complementarios para recuperar los metales separados. Se descarta recuperación de Si	<b>Costos totales:</b> <b>0.006USD/kg</b>
	(Akimoto, Iizuka, & Shibata, 2018)	Marco. Caja de conexiones.  Vidrio de alta pureza 96%, Si 72%  Al 97%, Ag 9.7%	Bajos costos de operación.  Alto rendimiento en separación de materiales	Parámetros estrictos de generador de pulsos. Proceso limitado a escala de laboratorio	0.0058 kWh por panel, 0.203 KWh por unidad funcional  <b>costos totales:</b> <b>0.0019 USD/W</b>

Tipo	Metodología	Materiales			
		recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
Térmicos	(Riech, y otros, 2021)	Marco. Caja de conexiones. Vidrio fragmentado, Si 93%,	Disolución completa de encapsulante EVA, separación eficaz de lámina trasera de polímero. Alta pureza de Si recuperada	Alto consumo energético, uso de reactivos químicos contaminantes (HNO <sub>3</sub> , HF). Tiempos de grabado químico prolongados. Requiere métodos adicionales para separar los metales y el Si.	Muestras de 1g y 2x2 cm <sup>2</sup> emplean horno industrial resistivo a 650°C durante media hora.  <b>Costos totales: NR</b>
	(Dias, Javimczik, Benevit, & Veit, 2017)	Marco. Caja de conexiones. Estructura fotovoltaica triturada	Alto porcentaje de remoción de encapsulante EVA y lámina trasera de polímero.	No recupera materiales valiosos. Tiene capacidad reducida y no soporta grandes	Se emplea molino de cuchillos SRB 2305, por cada panel fotovoltaico EOL. Se usa horno industrial a 500°C durante una hora por cada 9g de

Tipo	Metodología	Materiales recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
				volúmenes de panel fotovoltaicos EOL.	triturado <b>Costos totales: NR</b>
	(Fiandra , Sannino, Concetta , & Graditi, 2019)	Marco de aluminio. Caja de conexiones. Vidrio 90%, Al 85%, Si 75%, Cu 98%, Tedlar	Recuperación de materiales valiosos, en tiempos cortos de ejecución. Uso adecuado de la energía térmica generada respecto a pirolisis convencional.	Generación de gases contaminantes como el dióxido de carbono, metano, propano y hexano, que serían determinantes en el proceso llevado a escala industrial.	Pulidora con corte de diamante por cada panel.  Pretratamiento: horno a 200 °C  Pirolisis: reactor a 500°C  <b>Costos totales: NR</b>
<b>Químicos</b>	<b>(Xu et al., 2021)</b>	N. R	Recuperación total de obleas de Si.	Emisiones de gases tóxicos por la disolución del	<b>Costos totales: N. R</b>

Tipo	Metodología	Materiales		Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
		recuperados en muestras (% peso a peso)				
					encapsulante EVA.	
	(Kim & Lee, 2012b)	N. R	Recuperación total de la oblea de Si mediante el uso de disolventes orgánicos y uso de ultrasonido.	Emisión de gases por la pirolisis y el uso de solventes orgánicos.		<b>Costos totales: N. R</b>
	(Savvilitidou & Gidarakos, 2020)	91.42% Ag	Una alta recuperación de Ag.	Baja efectividad en la recuperación de materiales.		<b>Costos totales: N.R</b>
	(W. H. Huang et al., 2016)	74% Ag, 84% Cu	La pureza de los materiales recuperados está por encima del	En el proceso de lixiviación se producen gases tóxicos como el dióxido de		<b>Costos totales: N.R</b>

Tipo	Metodología	Materiales recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
			99%	nitrógeno lo que dificulta la recuperación.	
	(Luo et al., 2021)	96.13% Ag, 96.03% Si	Se obtienen aguas residuales con Pb para tratamiento adicional.	Liberación de gases fluorados.	<b>Costos totales: N.R</b>
	(Dias et al., 2021)	63.50% vidrio, 22.33% marco.	Reduce el tiempo de inmersión en tolueno a comparación con otras investigacione s.	No es viable a escala industrial por los altos costos del reciclaje, podría ser viable si hubiera subsidios para el reciclaje.	Inmersión en tolueno (14 USD/panel fotovoltaico EOL), desmontaje manual (2.8 USD/panel solar), proceso térmico y lixiviación (0.6 USD/panel fotovoltaico EOL), electricidad requerida (2.6

Tipo	Metodología	Materiales		Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
		recuperados en muestras (% peso a peso)				
	(Yan et al., 2020)	100% obleas de Si	Se logra la recuperación del 100% de obleas de Si con un reactivo verde de baja toxicidad.	No recupera otros materiales, únicamente se enfoca en el Si.	<b>Costos totales: N.R</b>	USD/panel fotovoltaico EOL)
<b>Combinados</b>	(Azeumo et al., 2019)	76% vidrio	Disolución completa del encapsulante EVA en menos de 1 h como solvente tolueno en presencia de ultrasonido a	No recupera otros materiales, únicamente se enfoca en el vidrio.	<b>Costos totales: N.R</b>	

Tipo	Metodología	Materiales recuperados en muestras (% peso a peso)	Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
			200W.		
	(W. H. Huang et al., 2017)	74% Ag, 83% Cu, 90% Si, 100% vidrio, 100% caja de conexiones	-Pureza de los metales recuperados está por encima del 99%.  -Poco material de desechos y se neutralizan para un impacto ambiental mínimo.	Altos costos en el proceso de electroobtencion lo cual no lo hace viable a gran escala.	<b>Costos totales: N.R</b>
	(Duflou et al., 2018b)	86% Al, 95% Ag, 95% Cu, 98% de vidrio	Recuperación de varios materiales.	Liberación de gases fluorados en la disolución del encapsulante	<b>Costos totales: N.R</b>

Tipo	Metodología	Materiales recuperados en muestras (% peso a peso)		Ventajas	Desventajas	Costos de proceso
					EVA.	
	(Ardente et al., 2019)	88% vidrio, 90% Cu, 94% Al, 94 % Ag, 95% Si	Recuperación varios materiales.	Altos costos.		<b>Costos totales:</b> 29-30 USD/panel fotovoltaico EOL
			- Metodología viable a gran escala.			
	(Feldmann et al., 2019)	N.R	Recupera Ag, Si, Al y Cu	No reporta tasa de recuperación		<b>Costos totales:</b> N.R

\*Los acrónimos N.R hacen referencia a “No Reporta”

A partir de la literatura revisada, solo los procesos combinados permiten una alta recuperación de todos los materiales del reciclaje de los paneles fotovoltaicos EOL, siendo técnicamente factible a gran escala. Muchas investigaciones no reportan costos, pero si el consumo de energía requerido en el proceso. Por lo anteriormente visto, Sólo el método FRELP maneja un enfoque de recuperación de cada material presente en el panel fotovoltaico y, muestra con claridad un diagrama de cada proceso por el que se somete cada material que compone el panel fotovoltaico y el porcentaje de recuperación.

#### **4. Selección de la Metodología y Adaptación al Mercado Colombiano**

La restricción del mercado colombiano está sujeta a la capacidad fotovoltaica instalada en la actualidad y a lo largo de los últimos años. Los paneles fotovoltaicos tienen una vida útil de 25-30 años y este será el insumo disponible para la disposición y reciclaje.

##### **4.1 Unidad Funcional**

Es importante definir como primer paso la unidad funcional del reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL. La unidad funcional se puede considerar como la variable de entrada del proceso y es la referencia con la cual se realizan todos los cálculos y balances energéticos. Para el presente caso de estudio se define como 1000 (kg).

##### **4.2 Selección de Panel Fotovoltaico**

Para cuantificar el rendimiento de los procesos mencionados previamente, se tomará como modelo un panel fotovoltaico de potencia 550 [Wp], peso 28.5 kg (es decir se requiere 35 paneles fotovoltaicos EOL, para conformar una unidad funcional), área  $2.279 \times 1.134 \text{ m}^2$ , y 25 años de vida útil. La referencia del producto es JAM72S30 de la serie 525-550/MR, el cual cumple con los criterios de gestión de calidad tanto de las normas ISO 90001, ISO 14001, ISO 45001, como las certificaciones IEC 61215, IEC 61730, UL 61730, UL 61215 e IETC TS 62941. Este panel fotovoltaico es ampliamente comercializado en Colombia, y fabricado por JA Solar el cual es un referente en el mercado de paneles fotovoltaicos a nivel mundial (Zhang, 2023). En la tabla 3 se detalla la masa individual de los materiales que componen un panel fotovoltaico, y su equivalencia en una unidad funcional.

**Tabla 3.***Unidad Funcional (Una Tonelada de Paneles Fotovoltaicos EOL) para un Panel Fotovoltaico**Modelo de 550 [Wp].*

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de peso en un módulo (%)</b>	<b>Peso en un Panel fotovoltaico (kg)</b>	<b>Peso en unidad funcional (kg)</b>
<b>Vidrio</b>	70	19.95	698.25
<b>Marco de aluminio</b>	18	5.28105	184.83675
<b>Encapsulante EVA</b>	5.1	1.4535	50.8725
<b>Celda solar de Silicio (Si)</b>	3.65	1.04025	36.40875
<b>Polímero de lámina trasera</b>	1.5	0.4275	14.9625
<b>Cables</b>	1	0.285	9.98725
<b>Conductor interno de Aluminio (Al)</b>	0.53	0.015105	0.528675
<b>Conductor interno de Cobre (Cu)</b>	0.11	0.03135	1.09725
<b>Plata (Ag)</b>	0.053	0.015105	0.528675
<b>Otros metales</b>	0.053	0.015105	0.528675
<b>Total</b>	100%	28.5	1000

*Nota: Adaptado de Latunussa et al., 2016*

### 4.3 Selección de la Metodología de Reciclaje de los Paneles Fotovoltaico EOL

En vista de las cualidades expuestas del método FRELP en el capítulo 2, se selecciona este método basado en los siguientes argumentos: Primero, el método está orientado a la recuperación completa de materiales valiosos tales como vidrio, caja de conexiones, aluminio (Al), plata (Ag), cobre (Cu), silicio (Si), los cuales se obtienen en un alto grado de calidad y cantidad (Latunussa et al., 2016). Segundo, el método ya está operando a escala industrial, evidenciando un alto desempeño en la recuperación de materiales a una tasa de 1000 kg/h (Ramon et al., n.d.), a diferencia de otros métodos reportados en la literatura que, a pesar de tener un alto rendimiento, se encuentran aún en escala piloto, debido a los altos costos de electro obtención (W. H. Huang et al., 2017). Tercero, ya se cuenta con los volúmenes de paneles fotovoltaicos EOL que sugiere la literatura, para el desarrollo del método (Ramon et al., n.d.). Cuarto, en comparación con otros métodos de alto rendimiento, se cuenta con una trazabilidad reportada en la literatura, en cuanto a costos de proceso, y energía requerida para su desarrollo (Ardente et al., 2019)

El proceso FRELP desarrollado por la empresa italiana SASIL SpA inicialmente hasta una fase piloto con una capacidad de procesamiento de 1t/h de paneles fotovoltaicos EOL de silicio cristalino, evolucionó hacia una planta a escala industrial con procesamiento de 8000 t/año (Latunussa et al., 2016). El primer paso del proceso es el transporte hacia la planta de reciclaje, el segundo es la descarga de los paneles fotovoltaicos EOL en una banda transportadora donde se lleva al debido proceso de desmantelamiento. En primer lugar, se cortan los cables de cobre de la parte posterior del panel fotovoltaico de forma manual, seguidamente se cortan los bordes del marco de aluminio (Al). Como consecuencia los cables/caja de conexiones y marco de aluminio (Al) se separan de la estructura fotovoltaica. El marco se recoge y se lleva a su almacenamiento.

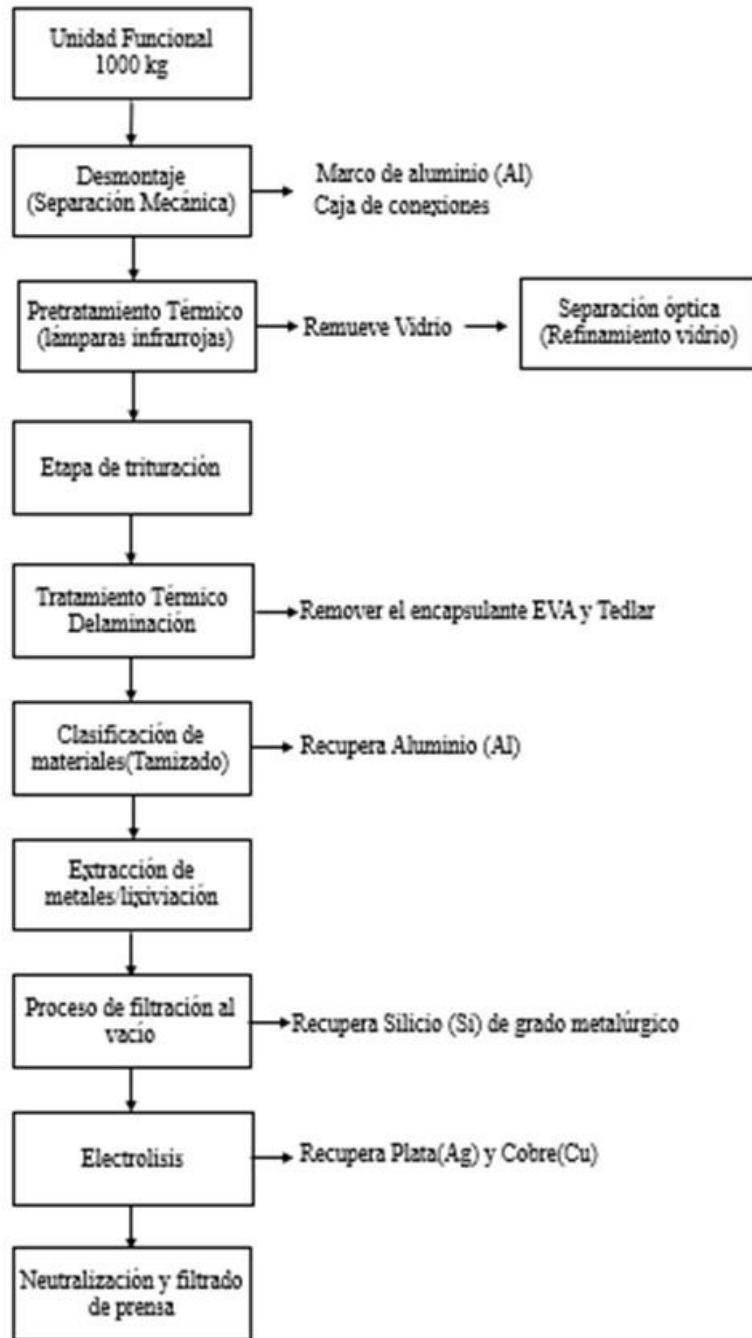
Los paneles fotovoltaicos EOL sin marco y sin cables se llevan a un siguiente proceso de separación del vidrio por medio de método térmico. El calentamiento de los paneles fotovoltaicos EOL se realiza mediante lámparas infrarrojo y el desprendimiento mediante cuchilla vibratoria. El calentamiento con rayos infrarrojos se realiza en dos etapas consecutivamente, el primer calentamiento se realiza con lámparas de infrarrojo de onda que calienta toda la estructura fotovoltaica a 60°C, el segundo calentamiento se realiza con lámparas de infrarrojo de onda corta que calienta las superficies que tienen contacto con el vidrio de forma diferenciada, es decir la parte oscura de la estructura fotovoltaica se calienta a 100°C mientras la superficie del vidrio se calienta a 70°C, esta diferencia de temperatura de 30°C hace que haya un desprendimiento del vidrio y de la estructura fotovoltaica para que seguidamente la cuchilla vibratoria despegue el vidrio (*Freelp by Sun – Recupero Componenti Fotovoltaici*, n.d.). Seguidamente el vidrio es se lleva a refinamiento, en este proceso el vidrio se separa en diferentes tamaños (1 mm a 2.5 mm y de 2.5 mm a 5mm) por medio de tamizado. Seguidamente el sistema de separación óptica permite retirar los vidrios con impurezas, que se envían a su disposición final.

A continuación, la estructura fotovoltaica que contiene las celdas solares de Si, el encapsulante EVA, electrodos y lámina trasera de polímero, mediante el proceso de corte se reducen en tamaño (piezas de 2 cm y 3 cm de dimensión), posteriormente se calientan a 500°C para la separación de metales. Las cenizas que quedan del tratamiento térmico se tamizan para recoger residuos de Al, seguidamente el resto de ceniza tamizada se lleva a un proceso de lixiviación. Durante el proceso de lixiviación, las cenizas que contienen metales se disuelven en ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y agua con peso de 7.08 kg y 173.21 kg respectivamente por unidad funcional (1000 kg). La disolución de los metales produce varios óxidos metálicos y deja el Si en

los residuos, seguidamente la mezcla se lleva a un proceso de filtración al vacío donde se recupera el 95% de Si en grado metalúrgico. Posteriormente el metal de silicio Si restante y otros metales disueltos en la solución ácida se tratan por el proceso de electrólisis donde se recupera Ag y Cu con eficiencia del 95% cada uno. El proceso de electrólisis produce gases reactivos tipo NOx (2 kg por tonelada de paneles fotovoltaicos EOL tratados). Los residuos del electrólisis quedan en la solución ácida que se llevan a un proceso de neutralización con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) cantidad de 36.5 kg por unidad funcional (1000 kg). El producto final del proceso de neutralización se filtra mediante un filtro prensa teniendo como resultado un líquido conformado por agua y nitrato de calcio y otro que contiene una mínima cantidad de materiales metales no recuperados con agua residual e hidróxido de calcio, cada una de estas sustancias se llevan a su disposición final en sanitarios (Latunussa et al., 2016). El esquema de procesos del método FRELP es ilustrado en la figura 6.

**Figura 6.**

*Descripción de la Metodología Seleccionada*



En la tabla 4 se puede observar la composición en masa de 1000 kg de paneles fotovoltaicos EOL de silicio cristalino (c-Si), la recuperación y la cantidad de materiales que se desperdician por los diferentes procesos, estas cantidades están especificadas en masa de la unidad funcional (1000 kg) cuando se aplica la metodología seleccionada FREL P.

**Tabla 4.**

*Flujo de Materiales en el Modelo FREL P de Reciclaje de Paneles Fotovoltaicos EOL*

<b>Unidad funcional 1000 (kg) paneles fotovoltaicos EOL</b>			
<b>Material</b>	<b>Materias primas (kg)</b>	<b>Materiales reciclados(kg)</b>	<b>Perdidas de Materias primas</b>
Vidrio	700	616	84
Marco	180	180	0
Encapsulante EVA	51	0	51
Celda solar de Si	36.5	34.675	1.825
Lámina trasera de polímero	15	0	15
Cables	10	0	10
Conductor interno de Al	5.3	4.876	0.424
Conductor interno de Cu	1.14	0.99	0.15
Ag	0.53	0.4982	0.0318
Otros metales	0.53	0	0.53
<b>Total</b>	<b>1000</b>	<b>837.0392</b>	<b>162.9608</b>

*Nota:* Adaptado de Latunussa et al., 2016

#### 4.4 Capacidad Fotovoltaica Instalada en Colombia

Se obtienen datos históricos de la capacidad instalada en [MW] de energía solar fotovoltaica en la última década en Colombia según los informes anuales de Planes de Expansión y Generación publicados por UPME (UPME, 2023), desde el año 2014 hasta los registrados en febrero de 2023, los cuales se presentan en la siguiente tabla. 5.

Considerando que los datos de capacidad instalada representan grandes volúmenes de paneles fotovoltaicos que en el futuro serán los insumos del proceso de reciclaje, resulta conveniente emplear la relación de [Ton/MW]. (Rong, Nathan, Chang, Zi Ouyang, & Chee Mung Chong, 2019).

Para determinar la cantidad de toneladas de paneles fotovoltaicos disponibles, es necesario aplicar el cálculo referido por (Domínguez & Geyer, 2017) el cual precisa de cuatro parámetros: capacidad instalada, composición del material, cuota de mercado, potencia nominal del panel fotovoltaico. La ecuación se presenta a continuación

##### Ecuación 1.

*Cálculo de toneladas por MW instalado*

*Contenido de material [kg]*

$$= \frac{\text{Capacidad instalada [W]} * \text{Composición material} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] * \text{cuota de mercado} [\%]}{\text{Potencia nominal de módulo} \left[ \frac{\text{Wp}}{\text{m}^2} \right]}$$

La equivalencia entre capacidad instalada y futuras unidades funcionales se presenta en la tabla 5.

**Tabla 5.***Capacidad Instalada de Proyectos Solares Fotovoltaicos desde el 2012-2023*

Año	Capacidad instalada [MW]	Equivalencia en unidades funcionales
2014	19.23	819.9672
2015	101	4306.64
2016	1245.99	53129.0136
2017	3369.81	143688.698
2018	4311	183821.04
2019	11162.25	475958.34
2020	7881.6	336071.424
2021	11658.8	497131.232
2022	8316	354594.24
2023	7867	335448.88

*Nota:* Capacidad instalada [MW] (SIEL, 2023)

#### **4.5 Distribución Weibull**

La distribución de Weibull es un modelo matemático que se caracteriza por considerar la tasa de fallos variables a lo largo del tiempo con datos reales e históricos de una planta, lo cual permite predecir el comportamiento de dicho fenómeno (Kuitche J. M., 2014). También es usado con otros enfoques, por ejemplo, (Wenceslas Koholé, Tonsie Djiela, Vincelas Fohagui, & Tchuen Ghislain, 2022) emplean la función de distribución de Weibull para estimar la radiación solar en diez ciudades de Camerún. Análogamente, (Anagreh, Bataihned, & Al-Odat, 2010)

emplea la distribución de Weibull para analizar el potencial eólico y solar de la ciudad Aqaba, en Jordán.

También, la investigación de Santos & Alonso-García, (2018) empleó la función distribución de Weibull para determinar los paneles fotovoltaicos EOL con proyección a 2050. Para el presente caso de estudio, la función de distribución de Weibull, es empleada para predecir las toneladas de paneles fotovoltaicos EOL en el futuro.

En investigaciones (Sica et al., 2018) precisan tres principales fases de fallas en los paneles fotovoltaicos: Fallas infantiles (0 a 4 años desde la instalación), fallas de mediana edad (5 a 11 años), fallas por desgaste (12-30 años, siendo 30 años la vida útil del panel fotovoltaico). Para estas fases las principales causas de fallas son: Falla infantiles, degradación inducida por la luz, montaje incompetente, mala planificación. Falla de mediana edad, decoloración del encapsulante EVA, rotura de vidrios, marcos sueltos, roturas de interconexión de celdas. Fallas por desgaste, corrosión de las celdas e interconectores, adicional de las causas de falla de mediana edad.

En el presente caso de estudio se plantea dos escenarios de pérdida, según la función de distribución de Weibull. Se asigna dos valores diferentes el factor de forma  $\alpha$ , el cual define el trazo de la función, describiendo cómo se comportan las fallas a través del tiempo, comúnmente el valor  $\alpha < 1$  para fallos o pérdidas de potencia en paneles fotovoltaicos a partir de los primeros cuatro años de fabricación; por el contrario, el valor  $\alpha > 1$  para fallas o pérdidas en el escenario de pérdidas regulares.

El siguiente factor, corresponde al factor de escala T, el cual se asocia con la vida útil del panel fotovoltaico, y corresponde al tiempo donde falla el 63.2% de la potencia instalada (Santos

& Alonso-García, 2018) (Weckend, Wade, & Heath, 2016) (Weckend, Wade, & Heath, 2016).

La función de distribución de Weibull se define a continuación:

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

#### 4.6 Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Futuro

Hasta ahora, se tiene los datos suministrados por la UPME, y las especificaciones del panel fotovoltaico seleccionado.

A continuación, es necesario hacer una proyección, de las toneladas de paneles fotovoltaicos EOL disponibles en el futuro, por lo cual es preciso emplear la distribución probabilística de Weibull.

En el presente caso de estudio, se emplea los datos de capacidad instalada de la tabla 5, la cuota de mercado, el factor de escala  $\alpha$ , y el factor de forma T, relacionados en (Weckend , Wade, & Heath , 2016), y que se han empleado en estudios relacionados (Santos & Alonso-García, 2018) y (Sultan Busra, y otros, 2023), con el fin de desarrollar una predicción de la cantidad en toneladas de paneles fotovoltaicos EOL dentro de los próximos treinta años, desde la perspectiva de escenario de pérdidas tempranas y escenario de pérdidas regulares. La simulación fue desarrollada en el software MATLAB, empleando los parámetros de la tabla 6 presentando los siguientes resultados:

#### Tabla 6.

*Parámetros Empleados para la Función de Distribución de Weibull*

Escenario	Factor de forma	Factor de escala	Cuota de mercado
Pérdidas tempranas	2.4928	25	82%
Pérdidas regulares	5.3759	25	82%

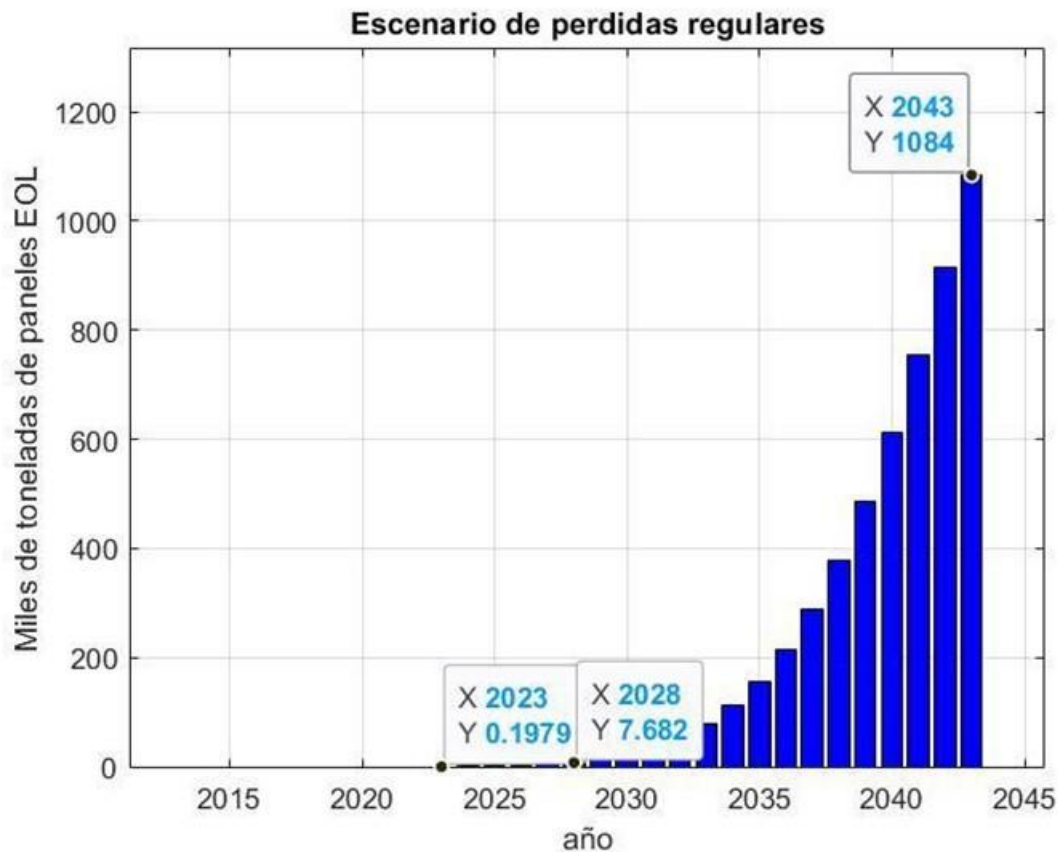
**Figura 7.**

*Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Escenario de Pérdidas Tempranas, Empleando la Función Distribución de Weibull*



**Figura 8.**

*Estimación de Toneladas Disponibles para Reciclaje en el Escenario de Pérdidas Regulares, Empleando la Función Distribución de Weibull*



Con respecto a los resultados del método Weibull en la figura 7 y figura 8, se evidencia que las pérdidas tempranas representan una diferencia drástica en cuanto a las pérdidas regulares, ya que, a partir del año del presente caso de estudio, es decir, el 2023, ya se dispone de 17 460 toneladas de paneles fotovoltaicos EOL que requieren ser reciclados, abasteciendo las cantidades requeridas para desarrollar el método, correspondientes a 7000 toneladas de paneles fotovoltaicos EOL. (Ramon et al., n.d.). Por otra parte, el escenario de pérdidas regulares tiene una tasa de aumento menor, donde las toneladas requeridas se obtienen hasta el año 2028.

#### 4.7 Adaptación al mercado colombiano del proceso FREL P

La adaptación al mercado colombiano del proceso FREL P se desarrolla como un caso de estudio. Donde se calcula el consumo energético del proceso requerido y se realiza una aproximación a los costos y ganancias que se podrían generar, al desarrollar este método en Colombia.

Se analiza desde el transporte de los paneles fotovoltaicos EOL a la planta de reciclaje, el consumo energético del proceso y de materiales e insumos requeridos con base en los datos de la literatura y del mercado colombiano.

##### 4.7.1 Consumo energético por etapas del proceso FREL P

El consumo energético total del proceso se puede calcular como la suma del consumo individual de cada etapa del proceso. El detalle de consumo energético se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7.**

*Consumo Energético del Proceso FREL P*

Etapa del proceso	Consumo energético (kWh)
Etapa de desmantelamiento	5.3
Etapa de separación del vidrio	48
Etapa de refinamiento del vidrio	3.2
Etapa de corte	0.25
Etapa de tamizado	56.8
<b>Total</b>	<b>113.55</b>

*Nota:* Datos adaptados (Ardente et al., 2019)

#### 4.7 Análisis de Rendimiento del Proceso FRELP

Una vez obtenidos los datos de consumo energético del proceso FRELP. Se procede a realizar una proyección de lo que representaría el funcionamiento de este método en el contexto colombiano. Para ello, se elige el perfil de un usuario representativo de la población, el cual tenga fácil acceso para el importe de unidades funcionales, así como la exportación de productos del reciclaje. Este usuario estaría ubicado en Bogotá, la capital de Colombia, en una zona urbana correspondiente al estrato socioeconómico 3, (el más común en Colombia según la Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE) (DANE, 2018). El usuario industrial característico según la resolución CREG 137 de 2013 será no contributivo.

A partir de la simulación realizada en la sección anterior, se cuenta con la cantidad suficiente de toneladas de paneles fotovoltaicos EOL para el presente año 2023. El método FRELP emplea una planta física con la siguiente maquinaria: sierra circular, separadora de perfiles de aluminio, separadora de caja de conexiones, separadora de vidrio, limpiador de película, separadora óptica, clasificadora óptica, y precisa de dos operarios por cada turno de 8 horas para cargar y separar manualmente los insumos y residuos de cada máquina en cada fase del método FRELP, en cada turno se opera una línea de producción de 1000kg/h. (Frelp by Sun – Recupero Componenti Fotovoltaici, n.d.).

Basado en las anteriores afirmaciones, se realiza el análisis para el reciclaje de una unidad funcional. Analizando los costos desde cuatro perspectivas: transporte del material hacia la planta, consumo energético, mano de obra e insumos. Para calcular ello se emplea el sistema de información de costos eficientes para el transporte automotor de carga SICE-TAC (Ministerio de Transporte de Colombia, sf ). suministrado por el Ministerio de Transporte en su portal web, tomando como referencia una tonelada de paneles fotovoltaicos EOL viajando desde la ciudad

de Ibagué departamento de Tolima (departamento que posee la mayor cantidad de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica según el informe Registro de Proyectos de Generación de Electricidad 2023 de la UPME) , hacia la planta en Bogotá, configurando un tipo de carga ‘general’, el tipo de vehículo es camión tres ejes-doble troque , tipo de unidad de transporte ‘estacas’. El costo de transportar una tonelada de paneles fotovoltaicos corresponde a COP\$ 158.462,71 /Unidad funcional, el resumen de los costos operativos se presenta en la figura 9 y el detalle de los cálculos en el Anexo 1. Respecto a la mano de obra se precisa de 2 trabajadores y 2 horas de trabajo para la actividad de reciclado de una unidad funcional. El valor del salario mínimo legal vigente para 2023 suministrado por el Ministerio de Trabajo correspondiente a COP\$1'260 000 mensual (Ministerio de Trabajo de Colombia, sf), como base para calcular el valor de las 2 horas laborales las cuales tendrán un valor de COP \$9666. Se procede a calcular el costo del consumo energético, tomando la tarifa diaria del [kWh] del operador de red ENEL, correspondiente a COP\$696.24 / [kWh] multiplicado por el consumo energético del proceso, 113.5 [kWh]. Los insumos adicionales según (Latunussa et al., 2016) corresponden a 0.309 m<sup>3</sup> estrato de agua, (Latunussa et al., 2016), los cuales se pueden cuantificar a partir de la tarifa establecida para el segundo semestre de 2023 del Acueducto de Bogotá (Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogota, 2023) por un valor de \$COP 4490.96/m<sup>3</sup> produce un valor de consumo de agua de \$COP 1387.7. También químicos como ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e hidróxido de calcio Ca (OH)<sub>2</sub>. El ácido nítrico HNO<sub>3</sub> tiene una densidad de 0.00151 kg/mL (Baer et al 2014) por tanto 7.08kg corresponde a 4688.7 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) cotizados con un proveedor local aleatorio de Bogotá, para este caso, ECOQUIM a un precio de \$COP 7941/L, desde su página web (Ecoquim, sf), produciendo un costo respectivo de \$COP 37.227,408. El compuesto

hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> se cotizó con el fabricante CORONA (Homecenter, sf) con un precio de \$COP 1.990 /kg por lo cual los 36.5 kg necesarios equivale a \$COP 72.635.

La tabla de costos para el reciclaje de paneles fotovoltaicos se presenta en la tabla 8.

**Figura 9.**

*Resumen de Costos Operativos, Obtenidos en la Plataforma del Ministerio de Transporte*

Costos Operativos - Resumen					
Tonelada x KM Movilización	\$298.16	Costo Tonelada Movilización	\$61,718.98	Costo Movilización Carga	\$987,503.69
Costo Hora Adicional	\$32,248	Horas de Espera	48,0	Costo Tiempos de Espera	\$1,547,899.68
Tonelada x KM del Viaje	\$765.52	Costo Tonelada del Viaje	\$158,462.71	<b>Costo Total del Viaje</b>	<b>\$2,535,403.37</b>
Costo x KM Movilización	\$4,770.55	Costo x KM del Viaje	\$12,248.33		

**Tabla 8.**

*Costos Directos para Reciclaje de una Unidad Funcional*

Costos de reciclaje [COP \$/ Unidad funcional]	
Transporte	158.462,71
Mano de obra	9.666
Energía eléctrica	79.023,24
Agua	1387.70
Químicos	109.862,40
<b>Total</b>	<b>358.402,05</b>

En la tabla 9 se puede observar los precios de cada material reciclado en el mercado por unidad funcional (1000 kg), siendo el marco de aluminio con el mayor beneficio económico, además que la demanda de los marcos de aluminio es grande y sostenible. Estos valores fueron encontrados en investigaciones (Deng et al., 2022) con precios en (USD) y fueron adaptados a la moneda nacional el día

17 de abril del 2023 con tasa representativa del mercado (TRM) de 4.428,50 pesos colombiano por 1 USD (Banco de la República de Colombia, 2023).

**Tabla 9.**

*Composición en Peso de Paneles Fotovoltaicos EOL y Valor del Material Reciclado*

<b>Unidad funcional 1000 kg de paneles fotovoltaicos EOL</b>				
<b>Material</b>	<b>Peso de material reciclado (kg)</b>	<b>Precio peso unitario (USD/kg)</b>	<b>Precio peso unitario (COP/kg)</b>	<b>Ingresos reciclados en 1000 kg</b>
Vidrio	616	0.091	402.9935	248243.996
Silicio (Si)	34.675	2.7	11956.95	414607.2413
Marco de aluminio (Al)	180	1.5	6642.75	1195695
Conductor interno de Cobre (Cu)	0.99	4.4	19485.4	19290.546
Plata (Ag)	0.4982	647	28652.395	14274.6231
Conductor interno de aluminio (Al)	4.876	1.5	6642.75	32390.049
<b>Total</b>	<b>837.0392</b>	<b>657.19</b>	<b>73783.2385</b>	<b>1924501.455</b>

Analizando los resultados de las tablas 8 y 9, los ingresos potenciales superan a los costos de proceso, por lo cual se obtiene una ganancia potencial, según se puedan comercializar los materiales recuperados, a los precios establecidos en la literatura (Deng et al., 2022). Es importante analizar que el transporte es una variable de impacto en el costo del proceso, y este puede disminuirse si se contemplan centros de abastecimiento en distancias comprendidas entre 100 y 400 km, según lo sugiere (Latunussa et al., 2016).

## 5. Conclusiones

Las metodologías actuales de reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL emplean diferentes enfoques: mecánico, térmico y químico. Estos métodos individualmente no resultan convenientes, ya sea por la baja tasa de recuperación de materiales, los altos costos de producción o el impacto ambiental, la demanda de energía o emisiones contaminantes. De otra parte, existe el método combinado el cual integra a los métodos mencionados anteriormente para aprovechar los aspectos destacables de cada uno y así configurar un método satisfactorio de reciclaje paneles fotovoltaicos EOL.

Los métodos mecánicos realizan trituración mediante martillos, rotores y generadores de onda de alto voltaje con el objetivo de reducir a fragmentos la estructura fotovoltaica, sin embargo, presentan limitaciones al momento de separar los productos fragmentados y recuperar los materiales valiosos debido a que quedan mezclados en los diferentes fragmentos de producto.

Los métodos térmicos se restringen únicamente a la disolución del encapsulante EVA, relegando la recuperación de materiales valiosos a otros métodos.

Los métodos químicos se enfocan en la recuperación de la oblea de Si, mediante la reacción de la estructura fotovoltaica con soluciones ácidas, o pirolisis. Además, recupera metales valiosos por medio de lixiviaciones, sin embargo, estos métodos son altamente contaminantes al liberar gran cantidad de ácidos fluorados.

Los métodos combinados reúnen a los métodos anteriormente mencionados. Recuperan la mayoría de los materiales valiosos requiriendo menor costo y con menor efecto ambiental.

La metodología seleccionada para el desarrollo del presente caso de estudio corresponde al método combinado FRELP (Full Recovery Life Photovoltaic) , el cual está dirigido hacia la

recuperación completa de los materiales que componen los paneles fotovoltaicos EOL. Este método es superior a los existentes debido a la tasa de recuperación de materiales de interés: vidrio 88%, Cu 90%, Al 94 %, Ag 94% y Si 95%. También presenta un bajo consumo energético, 113.5 [kWh] por unidad funcional, y su facilidad de adaptación a gran escala. Los datos de insumos, energía requerida, precio y cantidad de los materiales recuperados, reportados en la literatura, permiten identificar su conveniencia para adaptarlo al mercado colombiano. Se proyectó un caso de estudio de una planta reciclaje de paneles fotovoltaicos EOL operando en la ciudad Bogotá, capital de Colombia. Los costos de proceso calculado corresponden a \$COP 358.402,05. Los Ingresos por venta de materiales recuperados corresponden a \$COP 1'924.501,455 y la ganancia potencial equivale a \$COP 1'566.099,405 por cada unidad funcional reciclada.

Los resultados del presente caso de estudio dependen de tres factores principales: ubicación de la planta, el valor del salario laboral para un año determinado, y la equivalencia de dólares en pesos colombianos para un intervalo de tiempo específico. En efecto, los resultados del caso de estudio no representan un valor estandarizado, por todo lo anterior equivalen a una aproximación.

Según los datos de capacidad instalada suministrados por la UPME, y la proyección de paneles fotovoltaicos EOL realizada en el presente caso de estudio mediante la función de distribución de Weibull,

### Referencias

- Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogota. (23 de 3 de 2023). Atención y servicios a la ciudadanía. Obtenido de <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas2023>
- Akimoto, Y., Iizuka, A., & Shibata, E. (2018). High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels. *Minerals Engineering*, 125, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.015>
- Anagreh, Y., Bataihned, A., & Al-Odat, M. (2010). Assessment of renewable energy potential, at Aqaba in Jordan. *Renewable and Suitable Energy Reviews Vol 14*, 1347-1351.
- Ardente, F., Latunussa, C. E. L., & Blengini, G. A. (2019). Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management*, 91, 156–167. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.04.059>
- Azeumo, M. F., Conte, G., Ippolito, N. M., Medici, F., Piga, L., & Santilli, S. (2019). Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 314–319. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2019.01.035>
- Baer, Tobias, D. J., & Mundy, C. J. (2014). Investigation of Interfacial and Bulk Dissociation of HBr, HCl, and HNO<sub>3</sub> Using Density Functional Theory-Based Molecular Dynamics Simulations. *Journal of Physical Chemistry. C*, 118(50), 29412–29420. <https://doi.org/10.1021/jp5062896>

Bai-Peng, S., Meng-Yao, Z., Yue, F., Ling, J., Jun, K., Ting-Tao, G., . . . Xiang, Z. (2020).

Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation. *Waste Management* 101, 180-187.

Banco de la República de Colombia, 2023. Tasa representativa de mercado (TRM) Peso por

Dólar :<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>

Barker, B., & Kasprzak, D. (1993). Thermal degradation of commercial fluoropolymers in air.

*Polymer Degradation and Stability*, 181-183.

Beijia, H., Zhao, J., Jingyang, C., Bin, X., Feng, Z., & Xiangyu, W. (2017). Environmental

influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy* Vol 143, 132-141.

Benda, V. (2018). Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology. In *A Comprehensive*

*Guide to Solar Energy Systems* (pp. 181–213). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811479-7.00009-9>

Byungjo, J., Jongsung, P., Donghwan, S., & Nochang, P. (2016). Sustainable System for Raw-

Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4079-4083.

Castaño Gomez, M., & García Rendón, J. (2020). Análisis de los incentivos económicos en la

capacidad. *Lecturas de Economía* No 93, 23-64.

Chen, W. S., Chen, Y. J., & Chen, Y. A. (2019). The application of organic solvents and thermal

process for eliminating EVA resin layer from waste photovoltaic modules. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 291(1), 012012.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/291/1/012012>

- Chen, W. S., Chen, Y. J., Lee, C. H., Cheng, Y. J., Chen, Y. A., Liu, F. W., Wang, Y. C., & Chueh, Y. L. (2021). Recovery of valuable materials from the waste crystalline-silicon photovoltaic cell and ribbon. *Processes*, 9(4), 712. <https://doi.org/10.3390/pr9040712>
- Chenlong, Z., Jianhang, J., En , M., Lei , Z., Jianfeng , B., Jingwei, W., . . . Ruixue, W. (2022). Recovery of silver from crystal silicon solar panels in Self-Synthesized choline Chloride - Urea solvents systems. *Waste Management* 150, 280-289.
- CREG. (s.f.). [www.creg.gov.co](http://www.creg.gov.co). Obtenido de [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0137\\_2013.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0137_2013.htm)
- DANE. (2018). <https://www.dane.gov.co/>. Obtenido de <http://systema59.dane.gov.co/bincol/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CNPVBASE4V2&lang=esp>
- de Marco, I., Caballero , B., Chomón, M., M.F., L., Torres, A., Fernandez , G., & Arnaiz, S. (2008). Pyrolysis of electrical and electronic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* Vol 82, 179-183.
- Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106612. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106612>
- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., & Veit, H. (2017). Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 716-722.
- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., Veit, H., & Bernardes, A. M. (2016). Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic

- modules. Waste Management, 57, 220–225.  
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2016.03.016>
- Dias, P., Schmidt, L., Monteiro Lunardi, M., Chang, N. L., Spier, G., Corkish, R., & Veit, H. (2021). Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105241.  
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105241>
- Divya, A.; Adish, T.; Kaustubh, P.; Zade, P.S. (2023). Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells Vol 253*.
- Domínguez, A., & Geyer, R. (2017). Photovoltaic waste assessment in Mexico. *Resources, Conservation & Recycling*, 29-41.
- Dominguez, A., & Geyer, R. (2019). Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. *Renewable Energy Vol 133*, 1188-1200.
- Duflou, J. R., Peeters, J. R., Altamirano, D., Bracquene, E., & Dewulf, W. (2018a). Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery. *CIRP Annals*, 67(1), 29–32.  
<https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2018.04.053>
- Ecoquim. (sf). Ácido nítrico 55% tambor 250LT. <https://ecoquim.com.co/acido-nitrico-tambor/>
- Enel. (s.f.). Tarifas de energía. Obtenido de <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>
- Feldmann, F., Fellmeth, T., Steinhauser, B., Nagel, H., Ourinson, D., Mack, S., Lohmüller, E., Polzin, J.-I., Benick, J., Richter, A., Moldovan, A., Bivour, M., Clement, F., Rentsch, J., Hermle, M., & Glunz, S. W. (2019). Innovative Recycling of End of Life Silicon PV

- Panels: Materials Recovering and Glass Re-Use. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1247–1251.  
<https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20192019-4AV.2.55>
- Fiandra, V., Sannino, L., Concetta, A., & Graditi, G. (2019). End-of-life of silicon PV panels, A sustainable materials recovery process. *Waste Management*, 91-101.
- Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., Corcelli, F., & Graditi, G. (2019). Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials. *Waste Management*, 87, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.004>
- Función Pública. (s.f.). [www.funcionpublica.gov.co](http://www.funcionpublica.gov.co). Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (2014). Recycling photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 239-248.
- Homecenter. (sf). Productos químicos. Cal hidratada 10 kilos, Corona. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/159397/cal-hidratada-10-kilos-corona/159397/>
- Huang, F. C., Zhang, W. J., Zhao, Y. Q., -, al, Subramanian, V., Tembo, P., Heninger -, M., Sakuma, J., Kamide, K., & Mochizuki, T. (2021). An Investigation of the Recovery of Silicon Photovoltaic Cells by Application of an Organic Solvent Method. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10(2), 025001. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ABE093>

- Huang, W. H., & Tao, M. (2015). A simple green process to recycle Si from crystalline-Si solar cells. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356259>
- Huang, W. H., Shin, W. J., Wang, L., & Tao, M. (2016). Recovery of valuable and toxic metals from crystalline-Si modules. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2016-November, 3602–3605. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7750344>
- Huang, W. H., Shin, W. J., Wang, L., Sun, W. C., & Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy*, 144, 22–31. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.01.001>
- Irena and IEA-PVPS. (2016). End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. In International Renewable Energy Agency and the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- Irena AndIEA PVPS. (2014). IEA\_PVP. International Renewable Energy Agency and the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS-AR-2014\\_2.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS-AR-2014_2.pdf)
- Irena. (2022). World Energy Transitions Outlook 2022.
- Irena. (2023). Renewable capacity statistics 2023. Renewable capacity statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi., 27.
- Jonai, S., Hara, K., Tsutsui, Y., -, al, Subramanian, V., Tembo, P., Heninger, M., Sheng Chen, W., Jung Chen, Y., & An Chen, Y. (2019). The application of organic solvents and thermal process for eliminating EVA resin layer from waste photovoltaic modules. IOP Conference

- Series: Earth and Environmental Science, 291(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/291/1/012012>
- Kim, Y., & Lee, J. (2012a). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, 317–322. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.11.022>
- Kim, Y., & Lee, J. (2012b). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, 317–322. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.11.022>
- Klugmann-Radziemska, E. (2013). Current Trends in Recycling of Photovoltaic Solar Cells and Modules Waste / Recykling Zużytych Ogniw I Modułów Fotowoltaicznych - Stan Obecny. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 17(1–2), 89–95. <https://doi.org/10.2478/CDEM-2013-0008>
- Kokul, S., & Bhowmik, S. (2021). Recycling of crystalline silicon photovoltaic solar panel waste to modified composite products. *Progress in Rubber,Plastics and Recycling Technology*, 327-339.
- Kuitche J. M. (2014). A statistical approach to solar photovoltaic module lifetime prediction (Order No. 3665929). Available from ProQuest One Academic. (1640906478). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/statistical-approach-solar-photovoltaic-module/d>.
- Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2016.03.020>

- Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. (2022). Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. *Waste Management*, 137, 312–318. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.11.024>
- Lovato, É. S., Donato, L. M., Lopes, P. P., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2021). Application of supercritical CO<sub>2</sub> for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 46, 101477. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477>
- Luo, M., Liu, F., Zhou, Z., Jiang, L., Jia, M., Lai, Y., Li, J., & Zhang, Z. (2021). A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106830. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106830>
- Manohar, M., Kley, E., & Ghosh, S. (2020). Microgrid protection under weather uncertainty using joint probabilistic modeling of solar irradiance and wind speed. *Computers and Electrical Engineering* Vol 86.
- Meng, T. (2021). Technologies to improve the profitability of Silicon PV Module recycling. *The 28th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices*, 55-58.
- Ministerio de Trabajo de Colombia. (s.f.). \$ 1.160.000 será el salario mínimo para 2023 y auxilio de transporte por \$ 140.606. Obtenido de <https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2022/diciembre/-1.160.000-ser%C3%A1-el-salario-minimo-para-2023-y-auxilio-de-transporte-por-140.606>
- Ministerio de Transporte de Colombia. (s.f.). Costos Eficientes. Obtenido de <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/4462/sice-tac/>: <https://plc.mintransporte.gov.co/Runtime/empresa/ctl/SiceTAC/mid/417>

- Mulazzani, A., Eleftheriadis, P., & Leva, S. (2022). Recycling c-Si Pv Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison. *Energies MDPI*.
- Mulazzani, A., Eleftheriadis, P., & Leva, S. (2022). Recycling c-Si Pv Modules: A Review , a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison. *Energies MDPI*.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Abo Atia, T., Altimari, P., Havlik, T., & Toro, L. (2017). Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated. *Waste Managment*, 422-431.
- Pang, S., Yan, Y., Wang, Z., Wang, D., Li, S., Ma, W., & Wei, K. (2021). Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111213. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2021.111213>
- Riech, I., Castro-Montalvo, C., Wittersheim, L., Giacomán-Vallejos, G., Gonzáles Sánchez, A., Gamboa-Loira, C., . . . Méndez-Gamboa, J. (2021). Experimental Methodology for the separation materials in the recycling process of silicon photovoltaic panels. *Materials MDPI*.
- Riech, I., Castro-Montalvo, C., Wittersheim, L., Giacomán-Vallejos, G., Gonzáles Sánchez, A., Gamboa-Loira, C., . . . Méndez-Gamboa, J. (2021). Experimental Methodology for the separation materials in the recycling process of silicon photovoltaic panels. *Materials MDPI*.
- Rong , D., Yuting, Z., & Yansong, S. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling process. *Resources , Conservation & Recycling*.
- Rong, D., Nathan, L., Chang, Zi Ouyang, & Chee Mung Chong. (2019). A techno-economic review of silicon phtovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 532-550.

- Rubino, A., Schiavi, P. G., Altimari, P., & Pagnanelli, F. (2021). Valorization of polymeric fractions and metals from end of life photovoltaic panels. *Waste Management*, 122, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.037>
- Ruixue, W., & Zhenming, X. (2014). Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic. *Waste Management*, 1455-1469.
- Ruixue, W., & Zhenming, X. (2014). Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic. *Waste Management*, 1455-1469.
- Santos, J., & Alonso-García, M. (2018). Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. *Journal of Cleaner Production*, 1613-1628.
- Savvilotidou, V., & Gidarakos, E. (2020). Pre-concentration and recovery of silver and indium from crystalline silicon and copper indium selenide photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119440. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119440>
- 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*, 162, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2016.12.038>
- Soowon, L., Yuto, I., Kazuhiro, M., Taketoshi, K., Takao, N., & Chiharu, T. (2021). Recovery of Silver From Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Cells by Wire Explosion. *IEEE Transactions on Plasma Science Vol 49*, 2857-2863.
- Sultan Busra, A., Emrullah, K., Hasan, H., Hakan, T., Huseyin, Y., & Recep, Y. (2023). Why PV panels must be recycled at the end of their economic life span? A case study on recycling together with the global situation. *Process Safety and Environmental Protection*, 63-78.
- Tamaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., & Salluzzo, A. (2015). Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence

- of metals in the gas emissions and in the ashes. *Renewable Energy*, 81, 103–112.  
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.03.014>
- Teng-Yu , W., Jui-Chung, H., & Chen-Hsun , D. (2012). Recycling of materials from silicon base solar cell module. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- UPME. (2014). Invierta y Gane con Energía. Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla\\_IGE\\_Incentivos\\_Tributarios\\_Ley1715.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf)
- UPME. (2014). Registro de Proyectos de Generación Inscripción. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 0520, 1–36.  
[http://www.siel.gov.co/Generacion\\_sz/Inscripcion/2017/Registro\\_Proyectos\\_Generacion\\_Mayo2017.pdf](http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2017/Registro_Proyectos_Generacion_Mayo2017.pdf)
- Wang, T. Y., Hsiao, J. C., & Du, C. H. (2012). Recycling of materials from silicon base solar cell module. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2355–2358. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318071>
- Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., & Geng, C. (2022). A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 248, 111976. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2022.111976>
- Weckend , S., Wade, A., & Heath , G. (2016). PV Panel composition and waste classification. *End of life Management Solar Photovoltaic Panels*, 37-45.
- Wenceslas Koholé, Y., Tonsie Djuela, R., Vincelas Fohagui, F., & Tchuen Ghislain. (2022). Comparative study of thirteen numerical methods for evaluating Weibull. *Cleaner Energy Systems*.

- Xiaopu, W., Xinyi, T., Xiaodong, C., Lingling, R., & Chunxiang, G. (2022). A review on end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 248.
- Xiaopu, W., Xinyi, T., Xiaodong, C., Lingling, R., & Chunxiang, G. (2022). A review on end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 248.
- Xiaotong, L., Huan, L., Jiachuan, Y., Hongwei, D., & Lei, Z. (2022). Back EVA Recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. *Waste Management* 137, 312-318.
- Xu, X., Lai, D., Wang, G., & Wang, Y. (2021). Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. *Chemical Engineering Journal*, 418, 129457. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129457>
- Xu, X., Lai, D., Wang, W., & Wang, Y. (2022). A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106284>
- Yan, Y., Wang, Z., Wang, D., Cao, J., Ma, W., Wei, K., & Yun, L. (2020). Recovery of Silicon via Using KOH-Ethanol Solution by Separating Different Layers of End-of-Life PV Modules. *JOM*, 72(7), 2624–2632. <https://doi.org/10.1007/S11837-020-04193-6/FIGURES/8>
- Yue, Y., Jiaping, Y., Xiuqing, Y., & Zhibo, Y. (2013). The MonteCarlo Method in Application of Fatigue Life Reliability Analysis. *Applied Mechanics and Materials Vols 395-396*, 822-825.

Zhang, O. (2023). JA Solar maintains highest AAA ranking in PV ModuleTech bankability ratings. Beijing: PR Newswire Association LLC.