

Propuesta metodológica para el proceso de reciclaje de silicio de grado solar en módulos
fotovoltaicos

Jorge Yair Moreno Celis

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Dra. en Ciencias Físicas

Codirector

César Antonio Duarte Gualdrón

Dr. en Ingeniería eléctrica e informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánicas

Escuela de Eléctrica y Electrónica

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	14
2. Metodologías para el reciclaje del silicio.....	14
2.1 Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino	14
2.2 Estructura general de los módulos de silicio cristalino.....	16
2.3 Composición de los módulos fotovoltaicos de silicio.....	17
2.4 Estructura de la celda solar de silicio.....	17
2.5 Reciclaje de módulos fotovoltaicos	19
2.6 Unidad funcional de reciclaje para módulos de silicio cristalino	21
2.6.1 Métodos mecánicos.....	24
2.6.2 Métodos térmicos.....	28
2.6.3 Métodos Químicos.....	31
2.6.4 Métodos combinados	36
2.6.5 Métodos de reciclaje con enfoques recientes.....	40
2.7 Métodos de purificación del silicio recuperado	43
3. Selección y propuesta de adaptación de la metodología de reciclaje a las condiciones del mercado colombiano.....	45

3.1 Selección de la metodología de reciclaje 45

3.2 Condiciones del mercado colombiano para el reciclaje de módulos fotovoltaicos 46

3.3 Potencia fotovoltaica instalada actualmente en colombia 47

3.4 Estimación de la cantidad de módulos fotovoltaicos instalados en el periodo 2015 a 2022 .. 48

3.5 Distribución de Weibull..... 50

3.6 Principales causas de fallos de los módulos fotovoltaicos..... 51

3.7 Escenarios de pérdidas tempranas y pérdidas regulares 51

3.8 Pronóstico de residuos de paneles fotovoltaicos generados 53

3.9 Adaptación de la metodología seleccionada a los escenarios propuestos..... 55

3.10 Estimación de la cantidad de paneles que pueden ser reciclados simultáneamente 59

4. Estimación del consumo energético durante el proceso de reciclaje del silicio de grado solar.63

4.1 Descripción del consumo energético por etapas 64

4.1.1 Etapa de desmantelamiento..... 65

4.1.2 Etapa de tratamiento solvotérmico “SSTD” 65

4.1.3 Etapa de tratamiento térmico (horno de mufla) 66

4.2 Estimación del consumo energético por etapas 67

5. Conclusiones 69

Referencias..... 72

Apéndices..... 94

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Estructura general de un módulo de silicio cristalino	16
Figura 2 Estructura general de una oblea de silicio cristalino	18
Figura 3 Descripción general del proceso de reciclaje por etapas	22
Figura 4 Estructura general del proceso de reciclaje para módulos de silicio por métodos mecánicos.....	25
Figura 5 Método térmico para el reciclaje de módulos de silicio	29
Figura 6 Método químico para el reciclaje de módulos de silicio	33
Figura 7 Métodos combinados para el reciclaje de módulos de silicio	37
Figura 8 Métodos con enfoques recientes para el reciclaje de módulos de silicio	41
Figura 9 Diagrama del proceso de refinado con disolventes	44
Figura 10 Capacidad fotovoltaica instalada según registro de la UPME de 2015 a 2022	48
Figura 11 Escenarios de pérdidas definidos mediante la distribución de Weibull	53
Figura 12. Estimación del volumen de residuos acumulados en Colombia para el año 2034	54
Figura 13 Representación gráfica del proceso	57
Figura 14 Descripción de la metodología seleccionada.....	58
Figura 15 Esquema del reactor brindado por el fabricante	60
Figura 16 Representación gráfica de la estimación realizada.....	61

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Flujo de referencia requerido de la unidad funcional (1 kg Si)	21
Tabla 2 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos mecánicos.....	27
Tabla 3 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos térmicos.....	30
Tabla 4 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos (silicio en polvo).....	35
Tabla 5 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos (obleas de silicio)	36
Tabla 6 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos combinados	39
Tabla 7 Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos modernos.....	43
Tabla 8 Paneles fotovoltaicos más comercializados en Colombia por algunas empresas	49
Tabla 9 Estimación de la cantidad de módulos y la masa fotovoltaica instalada en Colombia.....	50
Tabla 10 Parámetros encontrados en la literatura para la distribución de Weibull	52
Tabla 11 Estimación del consumo energético del proceso propuesto por etapas	67
Tabla 12 Estimación del consumo energético del proceso “SSTD”.....	68

Tabla 13 Estimación de la probabilidad de pérdidas para los dos escenarios según la distribución de Weibull..... 101

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Normativas implementadas en algunos países para el reciclaje	94
Apéndice B. Datos de proyección paneles fotovoltaicos en desuso	101

Glosario

F.C = Fracción conductora

F.I = Fracción intermedia

F.N = Fracción no conductora

N.R= No reporta información sobre el tema

T.R= Tasa de recuperación

MW= mega watts (unidad de potencia)

EVA= Etilvinilacetato es un polímero termoplástico conformados por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo.

Weibull= La distribución de Weibull es un modelo estadístico que permite predecir la tasa de fallos a lo largo del tiempo.

Resumen

Título: Propuesta metodológica para el proceso de reciclaje de silicio de grado solar en módulos fotovoltaicos*.

Autor: Jorge Yair Moreno Celis**

Palabras Clave: SoG-Si, Silicio, Reciclaje, fotovoltaico.

Descripción: Este trabajo se enfoca en realizar una propuesta metodológica para el reciclaje de silicio de grado solar (SoG-Si) de módulos fotovoltaicos, basándose en una metodología existente aplicable a gran escala, realizando la propuesta de adaptación de acuerdo a las condiciones del mercado colombiano, que tiene una alta demanda de paneles a reciclar proyectada a 2034, en base a los datos obtenidos de dos escenarios planteados según la distribución de Weibull, se estima la cantidad de paneles a ser reciclados en el periodo 2022 - 2034. La propuesta se centra en la recuperación de la oblea de silicio intacta a partir de módulos fotovoltaicos desechados, es decir, que han finalizado su vida útil o que por alguna razón no está funcionando correctamente. El proceso seleccionado propone una restauración general de la oblea de silicio a través de un método que recupera la oblea de forma no destructiva mediante la expansión solvotérmica junto a la descomposición térmica “SSTD”, además se deben implementar procesos de purificación posteriores tales como prepurificación y el texturizado químico asistido por metal (MACE) que permite reutilizar la oblea limpiando su superficie y generando texturas antirreflectantes que permiten obtener una pureza alta y una baja reflectividad.

* Proyecto de grado

** Facultad de Físico Mecánicas Escuela de Eléctrica y Electrónica Directora Mónica Andrea Botero Londoño Dra. en Ciencias Físicas Codirector César Antonio Duarte Gualdrón Dr. en Ingeniería eléctrica e informática

Abstract

Title: Methodological proposal for the recycling process of solar grade silicon in photovoltaic modules*.

Author: Jorge Yair Moreno Celis**

Keywords: SoG-Si, Silicon, Recycling, photovoltaic.

Description: This work focuses on making a methodological proposal for the recycling of solar-grade silicon (SoG-Si) from photovoltaic modules, based on an existing methodology applicable on a large scale, proposing adaptation according to the conditions of the Colombian market, which has a high demand for panels to be recycled projected to 2034, based on data obtained from two scenarios proposed according to the Weibull distribution, the number of panels to be recycled in the period 2022 - 2034 is estimated. The proposal focuses on the recovery of the entire silicon wafer from discarded photovoltaic modules, i.e., that have completed their useful life or for some reason are not working correctly. The selected process proposes a general restoration of the silicon wafer through a method that recovers the wafer in a non-destructive way using solvothermal expansion together with "SSTD" thermal decomposition, furthermore, subsequent purification processes such as prepurification and metal-assisted chemical texturing (MACE) must be implemented, which allows reusing the wafer by cleaning its surface and generating anti-reflective textures that allow obtaining high purity and low reflectivity.

* Final project for graduation

** Facultad de Físico Mecánicas Escuela de Eléctrica y Electrónica Directora Mónica Andrea Botero Londoño Dra. en Ciencias Físicas Codirector César Antonio Duarte Gualdrón Dr. en Ingeniería eléctrica e informática

Introducción

En los últimos años ha aumentado drásticamente el número de paneles fotovoltaicos instalados, debido a la disminución de los precios y a la democratización del uso de energías limpias como la solar, sobre energías fósiles. En Colombia, en la última década se ha aumentado la capacidad de generación fotovoltaica instalada, en distintos proyectos desarrollados por empresas particulares y el gobierno nacional. Para el año 2015 se tenían una capacidad instalada de 101,0 MW de generación fotovoltaica a gran escala, según la unidad de planeación minero-energética o UPME, mientras que para el año 2022 se tiene una capacidad total instalada de 11.713,4 MW (SIEL, 2022). Por tanto, en un futuro cercano se tendrá una cantidad significativa de residuos de sistemas fotovoltaicos y se deben tomar medidas al respecto.

En el mundo actualmente se plantean dos escenarios para proyectar la cantidad de residuos existentes de paneles solares a futuro: Un escenario de pérdidas regulares, donde se proyectan 1,7 millones de toneladas para el año 2030 y 60 millones para el año 2050, así mismo, un escenario de pérdidas tempranas que considera un flujo de 8 millones de toneladas de residuos para el año 2030 y 78 millones para el año 2050 (Weckend et al., 2016). Estos residuos generarán un impacto negativo ambiental si no son tratados adecuadamente; aunque en la actualidad la cantidad de residuos que se genera es limitada, normalmente estos son depositados en vertederos, situación inviable a futuro. Se necesitarán políticas y estrategias que incentiven a las empresas a desarrollar técnicas de reciclaje más eficaces, que sean amigables con el medio ambiente y que permitan la recuperación de materiales valiosos como el silicio.

La mayoría de los esfuerzos en la actualidad se enfocan en la recuperación de materiales valiosos (vidrio, aluminio, plata, cobre), sin embargo, la prioridad es el silicio cristalino, un material que puede ser reutilizado para la fabricación de nuevos módulos, siendo el material que domina el mercado actual de los módulos fotovoltaicos. En base a la literatura analizada, hay tres etapas clave en el proceso de reciclaje de silicio de grado solar: la primera es remover el marco de aluminio y la caja de conexiones; la segunda, retirar la lámina posterior (Teldar) y el encapsulante EVA mediante procesos térmicos, mecánicos, químicos o combinaciones de estos, que permiten separar el vidrio y liberar la oblea y finalmente tratar la oblea recuperada mediante procesos de purificación (Heath et al., 2020). Alternativamente, algunas metodologías descritas permiten recuperar el silicio en forma de polvo, generalmente de baja pureza, pero requieren procesos de purificación tradicionales que tienen un alto consumo energético.

En este trabajo se realiza una descripción general de los métodos encontrados en la literatura para el reciclaje de silicio, sin embargo, el proyecto se centra en la recuperación de silicio grado solar (alto valor). En la actualidad no existen procesos de reciclaje industrial que permitan la recuperación de obleas de silicio intactas con un alto nivel de pureza. En la mayor parte de Europa y de Asia, los módulos de desecho son reciclados a través de las líneas de reciclaje de vidrio o de metal existentes (Wambach et al., 2017), aunque existen plantas piloto de reciclaje de algunas empresas que están haciendo grandes avances para encontrar técnicas que permitan maximizar la recuperación de materiales valiosos de módulos fotovoltaicos de desecho (Müller et al., 2006; PV CYCLE programme reaches important milestone, 2014; ROSI SAS, 2017; ROTH International, 2018), aún falta mucho por mejorar. En relación con estas iniciativas, el objetivo de este proyecto es adaptar una metodología existente de reciclaje que permita la recuperación de silicio de grado solar de forma directa (Xu et al., 2022), principalmente de aquellos paneles que

están finalizando su vida útil, ya que según las estimaciones actuales generarán serios problemas de contaminación ambiental a nivel mundial en una o máximo dos décadas.

El documento está organizado de la siguiente manera. El capítulo I presenta una revisión de literatura sobre distintas metodologías utilizadas para el reciclaje de silicio de módulos fotovoltaicos, con una división por métodos: mecánicos, térmicos y químicos. Las metodologías estudiadas se estructuraron por etapas, lo que permite sintetizar la información acerca de cada metodología, facilitando la comprensión de los distintos procesos que son empleados en la recuperación del silicio. En el capítulo II se aborda la selección de la metodología de reciclaje con mayor potencial en Colombia, realizando adicionalmente una propuesta de adaptación de acuerdo con las condiciones del mercado colombiano (proyección residuos futuros). En el capítulo III se realizó una estimación del consumo energético con base en la metodología seleccionada, teniendo en cuenta sólo aquellas etapas que tienen un consumo eléctrico, para brindar una perspectiva del costo energético asociado al proceso de reciclaje.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para reciclaje de silicio grado solar (SoG-Si) a partir de módulos fotovoltaicos basados en silicio.

1.2 Objetivos específicos

Identificar las metodologías de reciclaje del silicio más utilizadas en la actualidad.

Seleccionar la metodología de reciclaje con potencial de aplicación en Colombia.

Realizar una propuesta de adaptación de la metodología seleccionada de acuerdo con las condiciones del mercado colombiano.

Estimar el consumo de energía durante el proceso de reciclaje del silicio.

2. Metodologías para el reciclaje del silicio

Este capítulo se centrará en describir las metodologías empleadas en la recuperación de materiales valiosos de módulos de silicio cristalino (silicio de grado solar), mediante los distintos enfoques existentes: mecánicos, térmicos, químicos, combinados y modernos, los cuales están centrados en el reciclaje de silicio en polvo o en forma de oblea, que pueda ser reutilizado en la industria fotovoltaica o como material base para otras aplicaciones electrónicas.

2.1 Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino

Una de las tecnologías más utilizadas durante las últimas décadas son los módulos de silicio cristalino, su componente fundamental son las celdas fotovoltaicas, que son dispositivos semiconductores que transforman los fotones provenientes del sol en energía eléctrica de corriente

continúa (WU YUANYUAN, 2016). Las celdas fotovoltaicas están formadas por un conjunto de láminas de silicio conocidas como obleas, que son las empleadas en la fabricación de las celdas c-Si y ensambladas mecánicamente añadiendo los electrodos metálicos (N. M. Kumar et al., 2020).

En la actualidad, existen dos tipos diferentes de módulos de silicio cristalino (c-Si) basados en la tecnología de celdas que emplean: monocristalinos (m-Si) y policristalinos (p-Si). En ambos casos, las celdas fotovoltaicas están unidas en configuraciones en serie y en paralelo para el proceso de fabricación de los módulos fotovoltaicos (Mathew et al., 2018). El silicio monocristalino consta de una estructura ordenada en la que los átomos se orientan en una misma dirección formando una red cristalina.

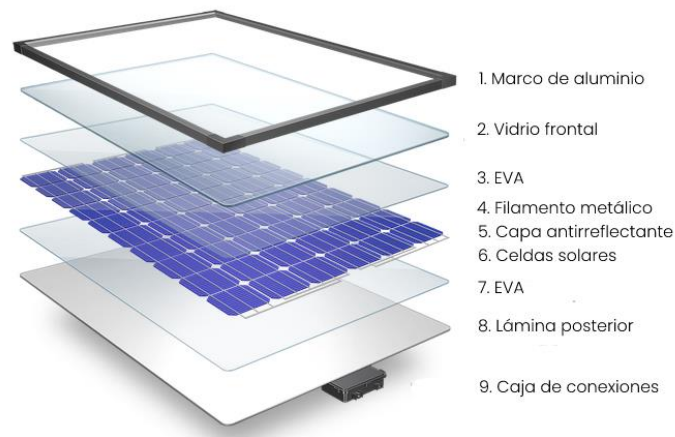
La fabricación de esta tecnología requiere de un proceso complejo, con un alto costo económico, pero con alto nivel de eficiencia (18-21 %). En el caso de los módulos de silicio policristalino, se componen de pequeños cristales de silicio con átomos ordenados de forma aleatoria, lo que ocasiona que su eficiencia (13-14 %) sea menor respecto al silicio monocristalino, pero con una ventaja que es un menor costo económico y una mayor cuota de mercado (Bagnall & Boreland, 2008; Saverio Petrangelo & Alessandra Bonoli, 2010).

La cuota de mercado de los módulos de silicio cristalino a nivel comercial es aproximadamente el 90 % mientras otras tecnologías comerciales como telurio de cadmio (CdTe) y seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) solo tienen un 7 % del mercado (T.-Y. Wang, 2016). En la Figura 1 se observa la estructura de un módulo de silicio cristalino, con las distintas partes que lo conforman.

2.2 Estructura general de los módulos de silicio cristalino

Figura 1.

Estructura general de un módulo de silicio cristalino



Nota. Daily Wealth (s.f.). Estructura general de un módulo de silicio cristalino.

El diseño de los módulos fotovoltaicos basados en silicio cristalino consta de diferentes elementos que conforman su estructura. Un esquema general de la construcción de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino es el presentado en la Figura 1, que está conformado por: (1) marco de aluminio, (2) vidrio frontal, (3) lámina superior del encapsulante EVA, (4) filamentos metálicos (C_u), (5) capa antirreflectante (AR), (6) celdas solares, (3) lámina trasera del EVA, (7) lámina posterior (TPT) y (8) la caja de conexiones.

2.3 Composición de los módulos fotovoltaicos de silicio

Marco de aluminio. Se elaboran principalmente de aluminio anodizado, que tiene una gran rigidez y resistencia mecánica (Santamaría & Castejón, 2019).

Vidrio frontal. Está elaborado en vidrio templado con un espesor menor a medio centímetro para brindar protección contra condiciones medioambientales e impactos (Santamaría & Castejón, 2019).

Encapsulante. Para su elaboración requiere el uso de polímeros, generalmente se emplea etil-vinil-acetato conocido comercialmente como EVA (Santamaría & Castejón, 2019).

Lámina posterior. La lamina posterior posee una estructura multicapa. Algunas configuraciones son: el TPT (Teldar/PET/Teldar) (Santamaría & Castejón, 2019), TPE (Teldar/PET/EVA) y TPOT (Teldar/PET/Oxido/Teldar) (Pern, 2008).

Celdas solares. Las celdas solares pueden estar conectadas en serie o en paralelo mediante grupos de celdas unidas en serie. Su conexión se realiza con cintas metálicas sobre una rejilla. Cada celda se conecta a su vecina mediante una polaridad definida previamente (Santamaría & Castejón, 2019).

Caja de conexiones. Se ubica en la parte posterior del módulo, se utiliza para proteger los bornes eléctricos del polvo y el agua (Santamaría & Castejón, 2019).

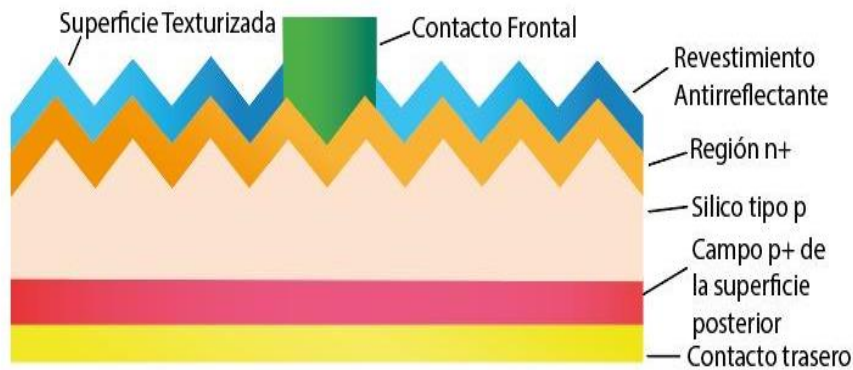
2.4 Estructura de la celda solar de silicio

La celda fotovoltaica tradicional es una estructura formada por capas basadas en un sustrato de silicio tipo p con una unión pn altamente dopada. Generalmente las celdas monocristalinas son

elaboradas mediante el procedimiento de Czochralski (CZ) o mediante una técnica más eficaz que permite obtener celdas solares de alta eficiencia conocida como proceso de zona flotante (FZ) (Bahrami et al., 2013), mientras las celdas policristalinas se pueden obtener por medio de un proceso de solidificación direccional (Shea, 2005). En la Figura 2 se observa la estructura general de una celda fotovoltaica de silicio cristalino.

Figura 2

Estructura general de una oblea de silicio cristalino



Nota. Adaptado de By Saga, T. (2010).

Las celdas solares de ambos tipos de módulos están compuestas por un revestimiento antirreflectante (AR), una región n+ dopada con fósforo sobre un sustrato de silicio tipo p, dopado con boro, formando la unión pn. El contacto frontal es de plata (A_g) y el trasero generalmente de aluminio (A_1) permiten el flujo de los electrones al circuito exterior (Saga, 2010).

2.5 Reciclaje de módulos fotovoltaicos

A nivel global existe una necesidad de crear normativas y políticas que incentiven el reciclaje de estos residuos a medida que los módulos se aproximan al final de su vida útil. Los materiales provenientes de estos módulos como: Aluminio, vidrio, celdas solares, polímeros como el EVA o Teldar y filamentos metálicos (C_u), pueden ser recuperados y reutilizados mediante procesos de refinado como materias primas en la industria fotovoltaica para la fabricación de nuevos módulos o como materiales compuestos (Cosnita et al., 2018; Heath et al., 2020; Lunardi et al., 2018; Seo et al., 2021). El reciclaje como estrategia para la gestión de módulos al final de su vida útil es una alternativa prometedora, contrario al vertido, que es considerado como la peor estrategia de gestión de residuos, debido al impacto ambiental que puede causar (Masoumian & Kopacek, 2015).

Es importante que los países de todo el mundo desarrollen marcos normativos para apoyar la gestión de residuos, la Unión Europea (UE) fue la primera en tener un marco regulatorio en torno al reciclaje para residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), entre los cuales se incluyen la tecnología fotovoltaica, mediante la Directiva 2012/19/UE (European Parliament and The Council of European Union, 2012). Esta normativa supone un gran avance para los países miembros de la Unión Europea, UE; sin embargo, países como China, Japón, India, Australia y EE. UU. a pesar de tener un mercado fotovoltaico en crecimiento, todavía no han implementado políticas regulatorias para la gestión de los residuos de paneles solares, siendo tratados en la actualidad como residuos sólidos peligrosos o como desechos electrónicos convencionales (RAEE) (Lunardi et al., 2018). Por tanto, se hace necesario que los gobiernos generen incentivos

tributarios para que las empresas impulsen procesos de reciclaje donde pueda ser posible la implementación de una economía circular para la reutilización de los materiales recuperados.

A pesar de que el desarrollo de procesos de reciclaje en la actualidad aún no es factible en la mayoría de los países, un grupo de empresas ha desarrollado alternativas para el tratamiento de las distintas tecnologías de módulos existentes, enfocándose principalmente en los módulos de silicio cristalino, debido a que tienen una mayor cuota de mercado. Deutsche Solar AG es una empresa alemana que construyó una planta para la recuperación de materiales valiosos como obleas de silicio, mediante el uso de distintos procesos que permiten su comercialización (Müller et al., 2006). PV CYCLE creado en el año 2007 para la gestión de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil en Europa, cuyo objetivo es que las compañías presten un servicio que brinde unas garantías para la gestión integral de los residuos (PV CYCLE programme reaches important milestone, 2014). El proceso de recolección se rige actualmente mediante los lineamientos dados en el año 2012 por la Directiva Europea de Residuos de Equipos Eléctricos y Electrónicos (WEEE).

Así mismo, la empresa ROSI en Francia está diseñando procesos ambientalmente amigables enfocados en recuperar materiales como la plata y el silicio de módulos fotovoltaicos, con un alto grado de pureza (ROSI SAS, 2017). Mientras ROTH International ubicada en Alemania se ha enfocado en reciclar todos los tipos y tamaños de módulos, mediante procesos innovadores, optimizando las metodologías existentes en la actualidad para un reciclaje más eficaz y rentable (ROTH International, 2018).

Los desafíos existentes en los distintos procesos de reciclaje y la estandarización de un proceso de reciclaje universal es un proceso complejo que exige centrarse en recuperar materiales

valiosos con el mayor nivel de pureza, un impacto ambiental mínimo, un consumo energético limitado y un coste económico reducido.

2.6 Unidad funcional de reciclaje para módulos de silicio cristalino

El primer paso del proceso de reciclaje consiste en definir una unidad funcional sobre la cual se realizará el proceso, esta puede estar compuesta por un módulo individual o por un conjunto de módulos. La unidad funcional es considerada una variable de entrada, se configura en función de la metodología empleada para el proceso de reciclaje.

En la Tabla 1, se detallan los componentes reutilizables de un módulo de silicio, con una unidad funcional de 1,66 paneles solares por cada kilogramo de silicio recuperado. Los polímeros (EVA, Teldar, Encapsulantes) son considerados en el peso inicial del panel (Ilias et al., 2018).

Tabla 1

Flujo de referencia requerido de la unidad funcional (1 kg Si)

Materiales	Cantidad de entrada requerida (kg/kg Si)
Marco de aluminio	3,66
Vidrio templado	26,47
Obleas de silicio	1,14
Filamentos metálicos (Cu y Cableado)	0,016
Peso total del módulo fotovoltaico	36,66

Nota. Adaptado de Ilias et al. (2018).

Descripción por etapas del proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos de silicio

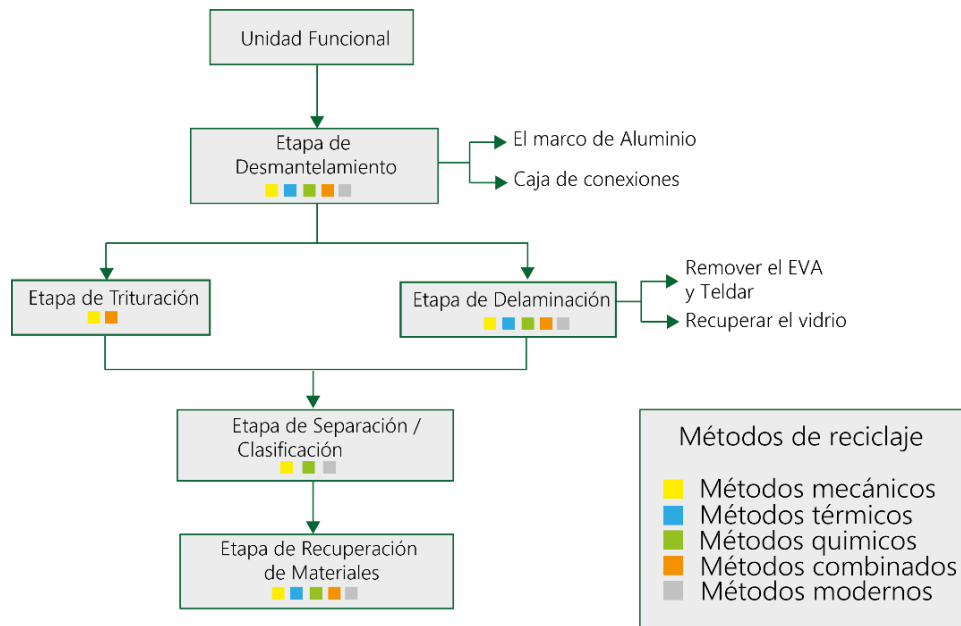
El proceso de reciclaje de los paneles de c-Si, requiere como primer paso remover el marco de aluminio y la caja de conexiones, este proceso es empleado por todas las metodologías

existentes, y puede ser realizado de forma manual (Akimoto et al., 2018; Del Pero et al., 2019; Duflou et al., 2018; Granata et al., 2014; Tokoro et al., 2021) o mediante mecanismos hidráulicos como las mesas de expansión (Del Pero et al., 2019). Luego es necesario separar el vidrio de la estructura de sándwich, lo cual requiere múltiples técnicas para remover las distintas capas y liberar las obleas de silicio, involucrando procesos que permiten separar y extraer los distintos materiales (Tao & Yu, 2015).

El proceso descrito se representa en la Figura 3. Se realiza una descripción por etapas donde se le asigna un color por defecto a cada uno de los métodos para que sea fácil identificarlos. En el cuadro de convenciones se detalla la información.

Figura 3

Descripción general del proceso de reciclaje por etapas



El proceso más empleado es la delaminación, el cual puede ser realizado por distintos métodos de tipo: Mecánico (Camargo et al., 2021; Duflou et al., 2018); térmico (Danz et al., 2019;

Dobra et al., 2022; Granata et al., 2014; Jung et al., 2016; Lee et al., 2018; Luo et al., 2021; Pagnanelli et al., 2017; Riech et al., 2021; R. Wang et al., 2019); químico como la pirólisis (Rubino et al., 2021; Yan et al., 2020); los disolventes orgánicos (Doi et al., 2001; Kang et al., 2012; Kim & Lee, 2012; Tickner et al., 2016); una combinación de pirólisis junto a solventes orgánicos (Huang et al., 2017; Klugmann-Radziemska et al., 2010; Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010; Radziemska et al., 2009; Xu et al., 2021) y la irradiación ultrasónica (Kim & Lee, 2012).

Alternativamente a la delaminación, los métodos mecánicos pueden emplear el uso de procesos físicos como la trituración (Akimoto et al., 2018; Azeumo et al., 2019; Duflou et al., 2018; Granata et al., 2014; Tokoro et al., 2021) que permite reducir el material a partículas finas de distintas dimensiones para luego ser clasificados y separados mediante el uso de procesos de tamizado. Esta etapa se conoce como separación de materiales y a pesar de su operatividad física, puede ser considerada como algo intermedio entre la delaminación o trituración y las técnicas de recuperación de materiales.

Finalmente, la etapa de recuperación se centra en el recobro de materiales valiosos como el silicio, la plata, el cobre, entre otros. Esto se realiza mediante distintos procesos como lo son: métodos mecánicos que emplean el tamizado o cribado (Del Pero et al., 2019; Duflou et al., 2018; Granata et al., 2014; Tokoro et al., 2021); químicos que hacen uso del grabado (Klugmann-Radziemska et al., 2010; Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010; Lee et al., 2018; Park et al., 2016; Park & Park, 2014; Riech et al., 2021; T. Y. Wang et al., 2012; Xu et al., 2021); la lixiviación (Chen et al., 2020, 2021; Jonai et al., 2019; Latunussa et al., 2016; Luo et al., 2021; Pagnanelli et al., 2017; Yi et al., 2014); y más recientes como la irradiación láser (X. Li et al., 2022) o la electroobtención (Huang et al., 2017).

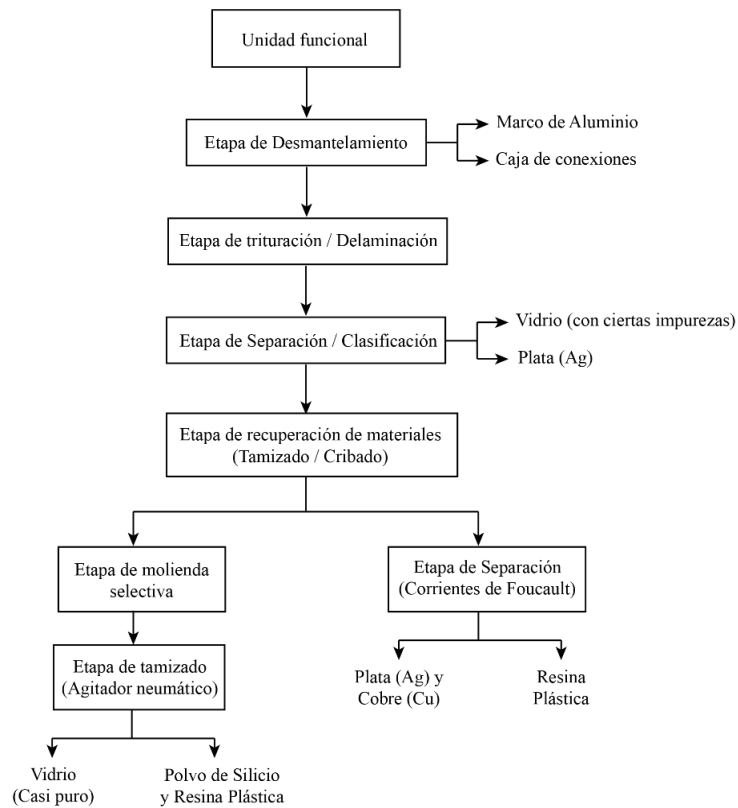
Todos los procesos de reciclaje descritos a continuación comienzan con la etapa de desmantelamiento, la unidad funcional considerada puede ser la presentada en la Tabla 1, después cada método aborda procesos y técnicas distintas para la recuperación del silicio. Los procesos de reciclaje se rigen de acuerdo con los lineamientos de la Directiva 2012/19/EU (European Parliament and The Council of European Union, 2012) que establece una tasa de recuperación superior al 80 % del contenido del panel.

2.6.1 Métodos mecánicos

El proceso de reciclaje comienza con una etapa de trituración (ver Figura 4), que puede ser realizada mediante distintos equipos, actualmente, el enfoque más empleado es el proceso de trituración para los RAEE convencionales (Duflou et al., 2018), aunque también suelen usarse equipos como molinos agitadores excéntricos (Tokoro et al., 2021), trituradoras de rotores de dos palas, trituradoras de rotores de dos cuchillas y trituradoras con martillos (Granata et al., 2014), o mediante pulsos de alta tensión, variando el rango tensión y el número de pulsos que son emitidos por segundo (Akimoto et al., 2018).

Figura 4

Estructura general del proceso de reciclaje para módulos de silicio por métodos mecánicos



Una alternativa a los procesos de trituración es la delaminación mecánica selectiva, algunas técnicas permiten separar directamente el vidrio de la estructura de sándwich (Duflou et al., 2018). La delaminación, puede ser realizada mediante procesos térmicos de alta temperatura, lo que permite eliminar polímeros como el EVA y el Teldar, degradándolos fácilmente (Granata et al., 2014), recuperando materiales valiosos como las obleas de silicio; este proceso suele emitir gases nocivos, producto de las reacciones químicas que se generan en el interior de los hornos, sin embargo, es importante resaltar que algunos procesos térmicos empleados para la eliminación del EVA remueven previamente la lámina posterior permitiendo la recuperación con una emisión de gases mínima (Komoto, 2014).

Posteriormente en la etapa de separación o clasificación, se emplean métodos como el de medio denso o gravedad, campos magnéticos, tamizado o algunos más recientes como las corrientes de Foucault que están centrados en la clasificación de materiales. Los procesos por medio denso o gravedad suelen realizarse para separar y recuperar materiales como la plata (Ag) (Akimoto et al., 2018; Tokoro et al., 2021) o el vidrio. Así mismo, los procesos de separación magnética suelen ser usados para la recuperación de elementos metálicos que tienen un alto valor (Duflou et al., 2018). Estos procedimientos tienen ventajas como un impacto ambiental reducido, y algunas desventajas debido a que los materiales recuperados suelen tener bajos niveles de pureza.

Generalmente la etapa de recuperación emplea el tamizado como proceso final que permite clasificar materiales en grupos específicos, dependiendo del tamaño de las ranuras o mallas empleadas, que varían en función de las dimensiones de las partículas a recuperar (Del Pero et al., 2019; Duflou et al., 2018; Granata et al., 2014; Tokoro et al., 2021). Los equipos empleados para este fin suelen ser cribas vibratorias, agitadores neumáticos, cribas estáticas, entre otros. Una alternativa empleada son las corrientes de Foucault que permiten clasificar y separar metales no ferrosos, como el aluminio y el cobre de materiales poliméricos (Samuel J. Ling, Jeff Sanny, 2012), ciertos procesos emplean esta técnica para separar el cobre de compuestos mixtos plásticos (resina) (Del Pero et al., 2019; Tokoro et al., 2021), seguidos de procesos de recuperación metalúrgica (Duflou et al., 2018), que aumenten la cantidad de material recuperado con un mayor nivel de pureza.

Finalmente, después de estas etapas se recuperan parcialmente materiales valiosos como el vidrio, el aluminio y el cobre, pero aún se requiere de etapas de operación posteriores para recuperar un mayor contenido de estos materiales como los son: partículas de vidrio y resina plástica que puedan ser reutilizadas (Tokoro et al., 2021), mientras que materiales como el silicio

requieren de etapas adicionales donde se apliquen procesos de refinación posteriores para su recuperación, aunque, estos no hacen parte del método mecánico. Generalmente el silicio recuperado de esta forma suele tener un bajo nivel de pureza debido a la presencia de contaminantes.

En la Tabla 2 se presenta un resumen sobre la tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos mecánicos. Los acrónimos N.R y T.R hacen referencia a “No Reporta” y “Tasa de Recuperación”, que serán empleados en distintas ocasiones en este documento, dentro de algunas tablas utilizadas para resumir la información relevante.

Tabla 2

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos mecánicos

Metodología	Silicio	Vidrio	Emisión de gases
(Tokoro et al., 2021)	N.R	97% (T.R)	N.R
(Granata et al., 2014)	N.R	Proceso 1 70 - 75 % (T.R) Proceso 2 80 - 85 % (T.R)	Por descomposición del EVA (Proceso 1)
(Duflou et al., 2018) Escenario Base	N.R	89,6% (T.R)	N.R
(Duflou et al., 2018) Escenario delaminación	N.R	98% (T.R)	N.R
(Akimoto et al., 2018)	77,9% (T.R)	85% (T.R) 95,2% (pureza)	N.R
(Del Pero et al., 2019)	N.R	80% (T.R)	Por incineración

Duflou et al. (2018b) plantea dos escenarios de recuperación: en el escenario base se recuperan (T.R) 78,1 % de Al, 34,7 % de Cu; el escenario de delaminación en cambio recuperó

(T.R) 86% de Al, 95 % Ag y 95 % Cu. Otros estudios como (Akimoto et al., 2018) recuperaron (T.R) 33,2 % de Ag y (Del Pero et al., 2019) recuperó (T.R) 40 % de Al y 65 % de Cu.

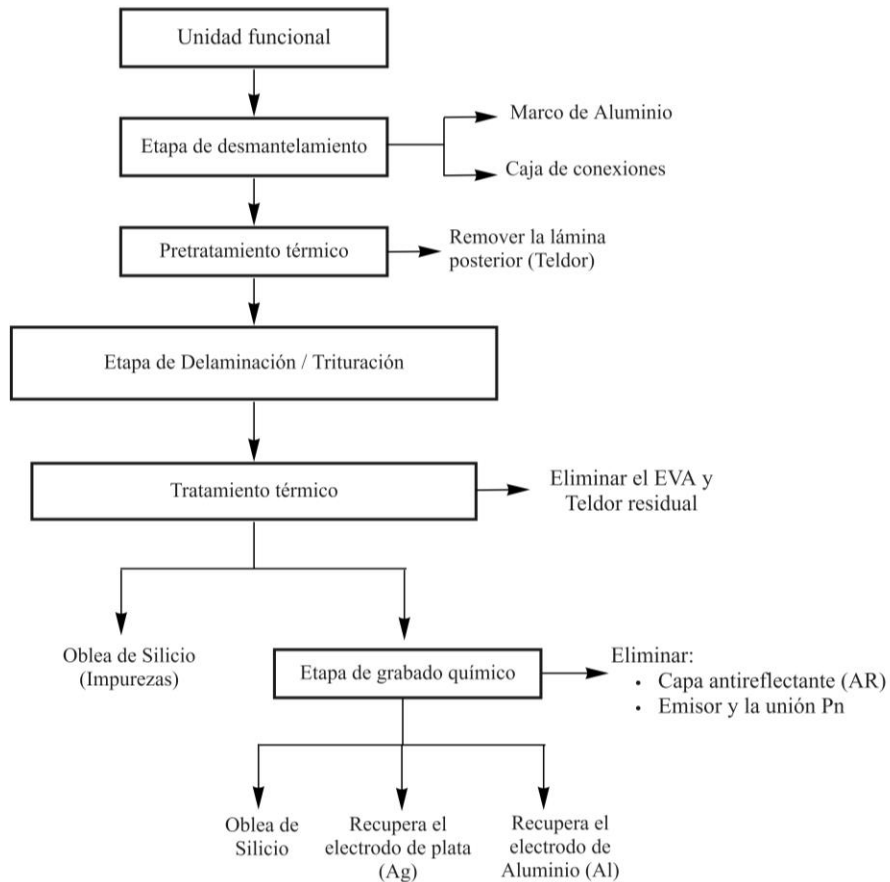
2.6.2 Métodos térmicos

El proceso de reciclaje térmico comienza con la eliminación del encapsulante EVA y de la lámina posterior de polivinil de fluoruro (PVF o Teldar), lo que permite liberar la capa de vidrio y la oblea de silicio, este proceso se realiza comúnmente mediante técnicas de delaminación térmica (Dobra et al., 2022), la duración crítica del proceso es esencial para una recuperación exitosa del material.

En la Figura 5 se detalla el proceso de reciclaje empleando métodos térmicos, se realiza una descripción por etapas, detallando en cada uno de los pasos los materiales a recuperar.

Figura 5

Método térmico para el reciclaje de módulos de silicio



La delaminación es uno de los pasos más difíciles del proceso de reciclaje y se aplican diversas técnicas para llevarla a cabo, algunas técnicas emplean procesos de delaminación mecánica junto con tratamientos térmicos que permiten la recuperación de materiales (Camargo et al., 2021). Otras alternativas empleadas para la delaminación (Danz et al., 2019; Pagnanelli et al., 2017) son los procesos de combustión, que involucran un pretratamiento en un reactor solvotérmico mediante el uso de solventes orgánicos (Xu et al., 2021), que permite la recuperación de las obleas de silicio intactas.

La solución empleada tradicionalmente en los procesos de grabado es el ácido nítrico (HNO_3), utilizado para recuperar el electrodo de plata (Ag), un metal valioso, mientras que soluciones como el hidróxido de potasio (KOH) se emplean para eliminar los contactos metálicos de aluminio y tratar los daños causados por el esmerilado en la superficie frontal de la oblea (Park et al., 2016). También se utilizan otros procesos adicionales de grabado ácido que permiten eliminar la unión pn y la capa de campo posterior (BSF) (T. Y. Wang et al., 2012).

El método térmico individual suele ser empleado en operaciones a pequeña escala. Se necesitan más investigaciones en el mediano plazo para mejorar los procesos empleados en la actualidad. En la Tabla 3 se presenta un resumen sobre la tasa de recuperación y pureza de los materiales recuperados por métodos térmicos.

Tabla 3

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos térmicos

Metodología	Silicio	Vidrio	Emisión de gases
(Xu et al., 2021)	86,11 % (T.R) (Obleas)	N.R	N.R
(Dobra et al., 2022)	N.R	99,8 % (T.R vidrio intacto)	Ácido fluorhídrico (sin pretratamiento térmico) Otros gases debido a la combustión
(Camargo et al., 2021)	31,7 % (T.R)	79,37 % (T.R)	HF y Benceno
(T. Y. Wang et al., 2012)	62% (T.R)	Aproximadamente el 100 % (T.R)	HF y Benceno

Camargo et al. (2021) presenta una tasa de recuperación (T.R) de 1,19 % para el cobre (Cu), mientras, T. Y. Wang et al. (2012) recuperó un 85 % de cobre (Cu). Adicionalmente Dobra

et al. (2022) reporta la recuperación de la oblea de si no rota con una mínima diferencia respecto al material virgen, sin embargo no detalla la T.R ni la pureza.

Los procesos térmicos que permiten la recuperación de la oblea intacta presentan inconvenientes con el rendimiento de las celdas solares recuperadas, ya que disminuye con su espesor, este método puede resultar inviable a futuro debido a que las nuevas tecnologías de fabricación se centran en obleas más delgadas (Akanksha Tyagi, 2021), sin embargo, el material recuperado puede emplearse en aplicaciones electrónicas.

2.6.3 Métodos Químicos

Después del desmontaje, el proceso de delaminación permite la recuperación de obleas mediante la descomposición del EVA y las capas poliméricas, entre los métodos más investigados para esta aplicación, se encuentra la pirólisis que facilita eliminar casi la totalidad de los polímeros presentes en los paneles (P. Díaz et al., 2017; Rubino et al., 2021; Yan et al., 2020). Así mismo, también es posible emplear el uso de disolventes orgánicos para liberar el material de silicio mediante un proceso medioambientalmente más amigable (P. R. Díaz et al., 2019; Doi et al., 2001; Kang et al., 2012; Kim & Lee, 2012). Algunas investigaciones han empleado la irradiación ultrasónica junto con el uso de solventes orgánicos para la recuperación de celdas con un impacto ambiental reducido (Kim & Lee, 2012). Estos tratamientos suelen emplearse debido a que los métodos térmicos convencionales (T. Y. Wang et al., 2012) suelen generar preocupaciones por la emisión de gases nocivos a la atmósfera.

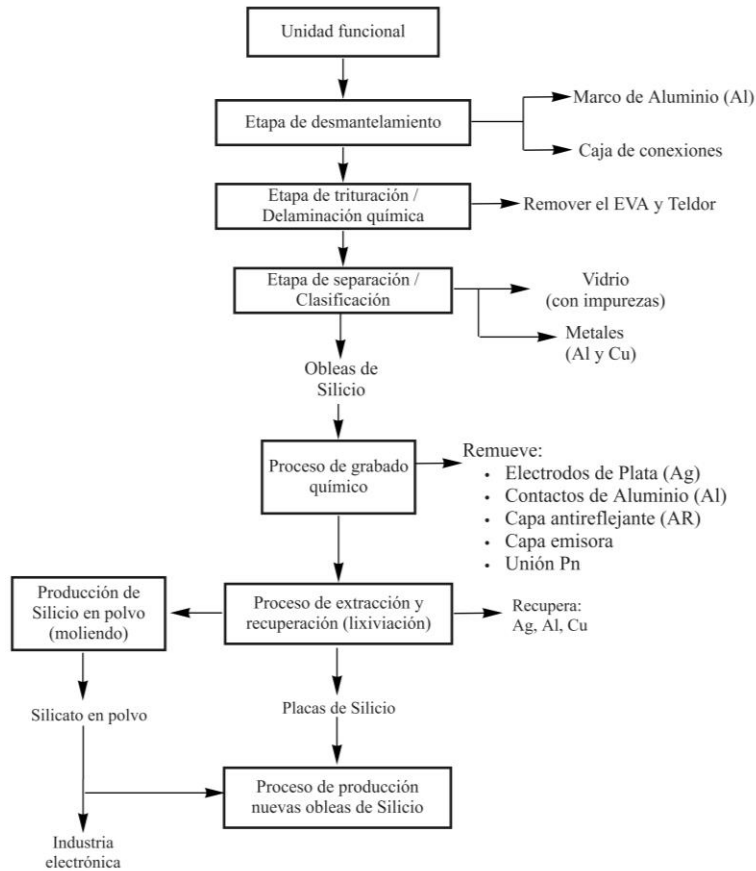
Las técnicas de recuperación de materiales en cambio emplean distintos procesos como el grabado químico que permite recuperar las obleas de silicio sin degradarlas. La lixiviación también

es otro método eficaz para la recuperación de las celdas solares, además permite disolver metales como el aluminio y la plata, para posteriormente realizar procesos de extracción selectiva. Estos procesos además permiten recuperar el silicio con un grado de pureza aceptable mediante el uso de las distintas técnicas (Chen et al., 2021, Chen et al. 2020; Yi et al., 2014). Algunos métodos, hacen uso de soluciones químicas junto a baños ultrasónicos para crear micro agitaciones y facilitar los procesos de lixiviación (Yi et al., 2014). Aunque la lixiviación parece prometedora, algunos estudios consideran que las concentraciones residuales analizadas superan los límites reglamentarios y deben ser considerados residuos peligrosos (Collins & Anctil, 2014). Así mismo, las soluciones residuales de estos procesos deben ser tratadas adecuadamente.

El proceso presentado en la Figura 6 describe el reciclaje por métodos químicos. Inicialmente se emplea un tratamiento mecánico por fresado (P. Dias et al., 2017) o de trituración (Rubino et al., 2021; Yi et al., 2014), del cual se obtienen distintas fracciones mediante tamizado para ser tratadas más adelante. Alternativamente, se emplea el proceso de delaminación química mediante pirólisis y solventes orgánicos que facilitan remover el EVA y las capas poliméricas como el fluoruro de polivinilo (PVF) o Teldar, recuperando materiales valiosos como el vidrio (Huang et al., 2017; Klugmann-Radziemska et al., 2010; Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010; Radziemska et al., 2009) que pueden ser reciclados directamente.

Figura 6

Método químico para el reciclaje de módulos de silicio



Nota. Adaptado de Klugmann-Radziemska & Ostrowski. (2010).

Después del tratamiento de delaminación o trituración, se realiza una etapa de separación de componentes, que permite clasificar los distintos materiales en grupos específicos, para su tratamiento posterior mediante otros procesos o su reciclaje directo. Así mismo, a las obleas recuperadas se les realiza una etapa de grabado químico que permite remover el electrodo de plata (Ag), los contactos de aluminio (Al), la capa antirreflectante (AR), la capa emisora y la unión p-n, mediante el uso de distintas soluciones como: ácido nítrico (HNO₃) y ácido fluorhídrico (HF), hidróxido de potasio (KOH) (Klugmann-Radziemska et al., 2010; Park & Park, 2014) o mediante

mezclas de grabado en ácido (Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010; Radziemska et al., 2009) que permiten eliminar eficazmente las capas no deseadas.

Finalmente, el proceso de extracción y recuperación de otros materiales valiosos se realiza por lixiviación (ácida o alcalina), que permite obtener los metales residuales haciendo uso de soluciones como el ácido clorhídrico (HCL) o mediante el uso de otros tipos de solventes (Chen et al., 2021, Chen et al. 2020) que permiten recuperar metales como la plata (Ag) y el aluminio (Al). Los elementos metálicos como el cobre (Cu), plomo (Pb) y estaño (Sn) pueden ser recuperados por extracción selectiva o mediante la electroobtención para recuperar eficientemente múltiples metales uno a uno (Huang et al., 2017).

El silicio recuperado presenta un nivel de pureza aceptable, aunque requiere de tratamientos de refinación posteriores para su uso como materia prima en la industria fotovoltaica, mientras que solo un proceso encontrado en la literatura permite recuperar directamente una parte de la oblea con un alto contenido de silicio de grado solar (Huang et al., 2017; Huang & Tao, 2015).

Las obleas de silicio recuperadas son llevadas a una etapa de control de calidad donde se evalúan las imperfecciones como el agrietamiento o la contaminación con impurezas residuales en su superficie, después de este proceso se obtienen placas de silicio, que pueden ser tratadas mediante distintos procesos para la producción de nuevas obleas (Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010; Park & Park, 2014; Radziemska et al., 2009).

Adicionalmente Huang et al. (2017) recuperó (T.R) un 90 % - 95% de Al y Cu, un 95 % para la Ag. Así mismo, Chen et al. (2020b) recuperó (T.R) 98% de Ag, con una pureza superior al 99 %, mientras, Chen et al. (2021) recuperó (T.R) 98,9 % de Al, 98,5 % de Ag con un 98,85 % (pureza) y 96,5 % (T.R) de Cu con 99,7% (pureza). Otros en cambio, como Rubino et al, (2021)

recuperaron 3,3 [Kg] de silicio, 4,5 [Kg] de vidrio, 10 [Kg] de aluminio y 0,03 [Kg] de Ag de un total de 100 [Kg] de residuos.

En la Tabla 4 se detalla la tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos para el silicio recuperado en polvo, que puede ser reutilizado como material de partida para muchas aplicaciones.

Tabla 4

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos (silicio en polvo)

Metodología	Silicio	Vidrio	Emisión de gases
(Yan et al., 2020)	95,29 % (T.R NaOH-etanol) y 96,27 % (T.R KOH-etanol)	Vidrio intacto recuperado	Contaminación mínima
(Kang et al., 2012)	86 % (T.R) 99,999% (Pureza)	Vidrio intacto recuperado	N.R
(Huang et al., 2017)	90 % (T.R) Pureza de grado solar	Vidrio intacto recuperado	Gases por la quema de EVA y PVF
(Chen et al., 2020)	99,5 % (T.R)	N.R	Impacto ambiental mínimo
(Chen et al., 2021)	99,9 % (T.R) 99,84% (Pureza)	Vidrio intacto recuperado	N.R
(Yi et al., 2014)	99% (T.R) y 99,998% (pureza)	N.R	Emisión de fluoruros

En la Tabla 5 se detalla la tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos en forma de oblea.

Tabla 5

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos químicos

(obleas de silicio)

Metodología	Silicio	Emisión de gases
(Doi et al., 2001)	Oblea de silicio intacta	Soluciones residuales
(Kim & Lee, 2012)	Oblea de silicio intacta	N.R
(Park & Park, 2014)	Obleas de silicio intactas (similares a las comerciales)	N.R
(Radziemska et al., 2009)	Obleas rotas o dañadas	N.R
(Klugmann-Radziemska & Ostrowski, 2010)	Obleas de silicio	N.R
(Klugmann-Radziemska et al., 2010)	Obleas de silicio	Emisión de gases y soluciones residuales

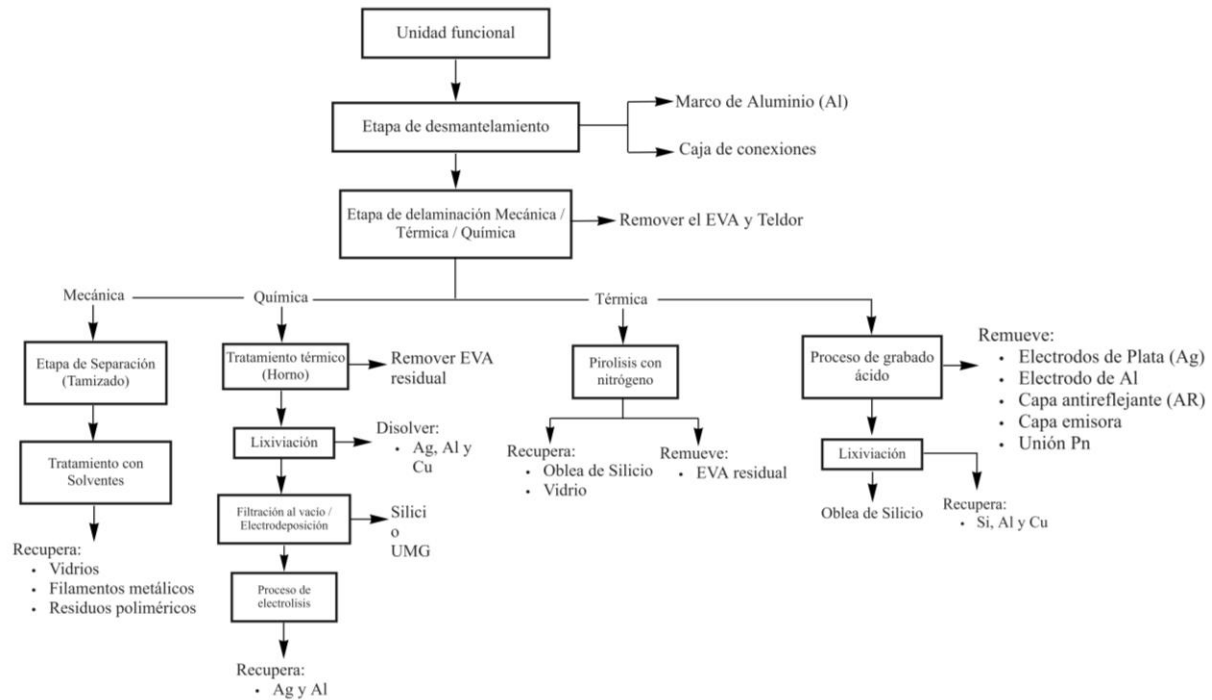
Nota. Ninguno de estos estudios detalló la recuperación de vidrio ni de otros materiales de alto valor.

2.6.4 Métodos combinados

El proceso de reciclaje por métodos combinados involucra tres operaciones principales (ver Figura 7), un tratamiento mecánico, uno térmico y uno químico, que se combinan entre sí, junto con otras tecnologías para permitir una recuperación más eficiente de los materiales valiosos.

Figura 7

Métodos combinados para el reciclaje de módulos de silicio



El primer paso consiste en separar la capa de vidrio de la estructura de sándwich (Latunussa et al., 2016). Así como remover el encapsulante (EVA) y la lámina posterior (Teldar) (Fiandra et al., 2019) para liberar la oblea de silicio. Alternativamente, se pueden emplear procesos de trituración (Azeumo et al., 2019; Pagnanelli et al., 2017, 2019), que permiten reducir en fracciones finas y gruesas de distinto tamaño, los materiales valiosos contenidos en los módulos fotovoltaicos, estos pueden ser recuperados mediante tamizado que junto al uso de solventes permiten recuperar fracciones de vidrio valiosas, filamentos metálicos y residuos poliméricos (EVA, celdas y lámina posterior) (Pagnanelli et al., 2019).

La delaminación también puede ser realizada mediante el uso de la pirólisis con nitrógeno, el proceso se lleva a cabo en un horno tubular durante una hora, la temperatura del proceso es de

500 °C con el nitrógeno actuando como gas protector, lo que permite eliminar el EVA por completo (R. Wang et al., 2019). Alternativamente, algunos procesos emplean una lámpara halógena de cuarzo que calienta el EVA, a la vez que permite eliminar la hoja de la lámina posterior mediante un proceso de raspado mecánico (Riech et al., 2021), como alternativa más amigable con el medioambiente, frente a los procesos convencionales que hacen uso de la combustión (Jung et al., 2016; Lee et al., 2018; Riech et al., 2021).

Posteriormente, se realiza un proceso de grabado químico haciendo uso de soluciones de HNO_3 al (70 %) y HF (40 %) para recuperar fracciones de silicio (Riech et al., 2021), alternativamente, se pueden emplear procesos de lixiviación en una solución ácida para disolver los metales presentes como: aluminio (Al), plata (Ag), plomo (Pb) y cobre (Cu) (Chen et al., 2019), los cuales son recuperados por procesos de electrodeposición (Huang et al., 2017). La tasa de recuperación para el Si, Cu y Ag es del 80 %, 79 % y 90 % (Jung et al., 2016). Adicionalmente, los procesos de filtración al vacío permiten recuperar un silicio de grado metalúrgico (Latunussa et al., 2016; Pagnanelli et al., 2017).

La etapa de recuperación se realiza mediante etapas de grabado en ácido con el objeto de recuperar las obleas intactas, removiendo simultáneamente el electrodo de aluminio (Al) y plata (Ag), la capa antirreflectante (AR), la capa de emisor y la capa de campo de la superficie posterior (Lee et al., 2018), lo cual facilita la fabricación de nuevas obleas.

Finalmente, las obleas recuperadas pueden ser remanufacturadas utilizando procesos de texturización junto a procesos para la formación del emisor, el aislamiento eléctrico, la capa antirreflectante (AR) y los electrodos (Lee et al., 2018). Las células refabricadas por este proceso presentan una eficiencia similar a las obleas comerciales.

R. Wang et al. (2019) permitió recuperar la oblea de silicio y el vidrio intacto con una emisión mínima de contaminantes. Así mismo, Lee et al. (2018) permitió recuperar la oblea de silicio intacta con un impacto ambiental reducido. Chen et al. (2019) recuperó (T.R) 0,15 % de Al, 0,01 % de Ag, 0,8 % de Cu, mientras, Azeumo et al. (2019) recuperó 9 % (T.R) de Al con 67,2 % (Pureza).

Otros como Jung et al. (2016) recuperaron (T.R) 94 % de Al, 79 % de Cu y 90 % de Ag con 99,99% (pureza). Estos valores son similares a los obtenidos por Latunussa et al. (2016) quien recuperó un 95 % (T.R) de Ag y Cu.

En la Tabla 6 se detalla la tasa de recuperación y pureza de los materiales obtenidos por métodos combinados.

Tabla 6

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos combinados

Metodología	Silicio	Vidrio	Emisión de gases
(Fiandra et al., 2019)	6,37 % (T.R)	71,20 % (T.R)	Compuestos orgánicos volátiles
(Chen et al., 2019)	36,19 % (T.R)	vidrio intacto	N.R
(Azeumo et al., 2019)	N.R	76 % (T.R) 96.1 % (pureza)	N.R
(Riech et al., 2021)	89 y 94 % (T.R)	vidrio intacto	Emisión de gases tóxicos y soluciones residuales durante el proceso
(Jung et al., 2016)	80 % (T.R)	N.R	N.R
(Latunussa et al., 2016)	95 % (T.R)	Vidrio en fragmentos	N.R
(Pagnanelli et al., 2017)	N.R	91 % (T.R)	Impacto ambiental reducido
(Pagnanelli et al., 2019)	N.R	85 y 87 % (T.R)	Impacto ambiental reducido

2.6.5 Métodos de reciclaje con enfoques recientes

En el proceso de reciclaje se considera adecuado remover previamente el material de soporte del módulo (Teldar). Las técnicas empleadas hacen uso del pulido mecánico, solventes como el tolueno, tratamientos térmicos con nitrógeno líquido o mediante el uso de pistolas de aire caliente portátil (Bogust & Smith, 2020; X. Li et al., 2022; Luo et al., 2021), lo que permite remover fácilmente la lámina posterior, evitando que se generen gases tóxicos en los procesos de delaminación posteriores.

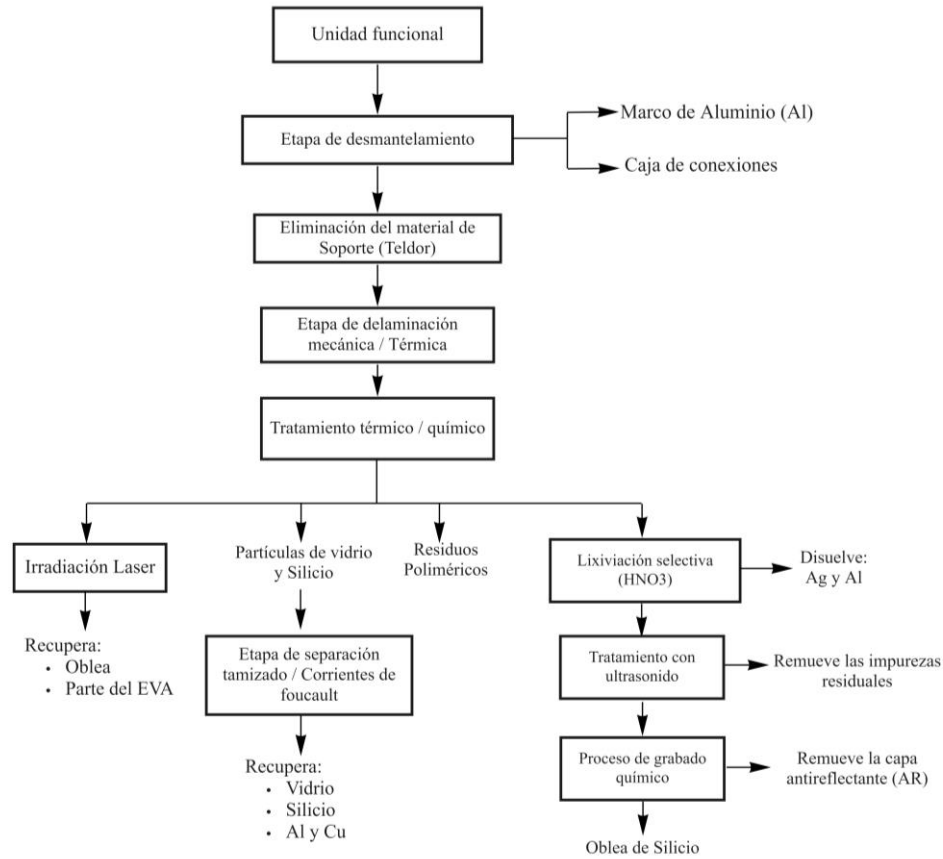
La etapa de delaminación puede realizarse mediante un proceso físico en el que los módulos son fresados mecánicamente múltiples veces, para luego separar los materiales mediante un separador electrostático de rodillos de alta tensión que clasifica los componentes en tres grupos: polímeros, silicio y vidrio con algunas impurezas metálicas (P. Dias et al., 2018). Así mismo, también puede emplearse un proceso de delaminación con fluido supercrítico ScCO_2 en un reactor de acero inoxidable unido al uso de un solvente miscible como el tolueno, que permite separar y recuperar el vidrio, los filamentos metálicos y la celda solar unida al encapsulante (EVA) (Lovato et al., 2021).

Alternativamente, puede ser empleada la pirólisis anaerobia a 500 °C, para la delaminación por métodos térmicos (ver Figura 8), lo que permite remover el EVA bajo la acción de un campo térmico uniforme sin generar gases contaminantes, recuperando la oblea intacta (Luo et al., 2021). Finalmente, un método novedoso hace uso de la expansión solvotérmica junto con la descomposición térmica (SSTD) (Xu et al., 2021) para la recuperación no destructiva de obleas de silicio, mediante un método conocido como M.A.C.E (texturizado mediante grabado químico asistido por metal) que permite obtener celdas solares de alta pureza (grado solar) con una

reflectividad muy baja, con una eficiencia de conversión de energía mayor que las de las celdas comerciales (Xu et al., 2022).

Figura 8

Métodos con enfoques recientes para el reciclaje de módulos de silicio



Posterior a la delaminación, se emplean técnicas que permiten recuperar materiales valiosos como el silicio y otros metales, por ejemplo, la irradiación láser permite irradiar específicamente el material encapsulante EVA con una potencia y frecuencia específica de 2,1 Mw/cm² y 50 kHz, esta técnica logra recuperar parte del encapsulante y liberar la oblea de silicio (X. Li et al., 2022). Otros procesos en cambio emplean técnicas como la lixiviación selectiva para

eliminar la mayoría de los metales presentes en las celdas solares, para lograr eso se usan precipitantes como el ácido clorhídrico (HCL) y procesos de filtración mediante ácido nítrico (HNO_3) que permiten recuperar la oblea de silicio intacta (Luo et al., 2021).

Para la recuperación individual de metales valiosos se hace uso de técnicas como las corrientes de Foucault, que permiten obtener partículas de aluminio (Al) con una alta tasa de recuperación (Bogust & Smith, 2020), la lixiviación ácida con HNO_3 (65 %) bajo agitación magnética permite recuperar el cobre (Cu) y la plata (Ag) (P. Dias et al., 2018), la separación mecánica (el proyecto ReSiELP), permite recuperar vidrio, cintas de cobre y cenizas con metales residuales (Rakotoniaina et al., 2019) con una gran eficiencia industrial. Finalmente, el tamizado es el proceso más utilizado para la recuperación de materiales valiosos, permite recuperar selectivamente partículas de silicio, vidrio y material de los electrodos (Bogust & Smith, 2020; P. Dias et al., 2018).

La purificación de las obleas puede ser realizada mediante tratamientos por ultrasonido para eliminar la plata (Ag) y el aluminio (Al) residuales en la superficie de la oblea, seguidos de procesos de grabado químico mediante el uso de fluoruro de hidrógeno (HF) al 20 % a 30°C , para remover la capa antirreflectante (AR) y la capa emisora de la oblea (Luo et al., 2021).

Se puede afirmar que, aunque los métodos modernos se postulan como una buena opción para los procesos de reciclaje, en la actualidad se necesitan más investigaciones para mejorar la cantidad y el nivel de pureza de los materiales recuperados. Se emplean las siguientes siglas para abreviar los términos empleados: fracción conductora (F.C), fracción intermedia (F.I) y fracción no conductora (F.N).

Adicionalmente Rakotoniaina et al. (2019) reportó la recuperación de 4.000 [Kg] del marco de Al, 60 [Kg] de cinta de Cu, 3,17 toneladas de vidrio y 72 [Kg] de Si, provenientes de una planta

de tratamiento de reciclaje. P. Dias et al. (2018) recuperó 95% (T.R) en F.C y la F.I, mientras, Bogust & Smith. (2020) recuperó 86% (T.R) de Al con un 100% (Pureza). Así mismo, Luo et al., (2021) en cambio recuperó 96,13% (T.R) y 99,8% (Pureza).

En la Tabla 7 se detalla la tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos modernos.

Tabla 7

Tasa de recuperación y pureza de materiales valiosos recuperados por métodos modernos

Metodología	Silicio	Vidrio	Emisión de gases
(P. Dias et al., 2018)	95% (T.R) (F.C Y F.I)	95% (T.R) (F.C)	N.R
(X. Li et al., 2022)	Oblea de silicio	N.R	Emisión mínima de gases
(Bogust & Smith, 2020)	88,2% (T.R) y 86,1% (pureza)	56,7 % (T.R)	N.R
(Lovato et al., 2021)	85,77% (T.R) Oblea más EVA	100% (T.R) y 84,61% (Pureza)	N.R
(Luo et al., 2021)	96,93% (T.R) obleas de silicio	N.R	Soluciones residuales neutralizadas

2.7 Métodos de purificación del silicio recuperado

El silicio requerido para aplicaciones fotovoltaicas debe ser de 6 N (donde la N denota el grado de pureza), mucho menor que el requerido en la industria electrónica (Yasuda et al., 2014). A partir de la literatura revisada hasta el momento, un estudio permite recuperar una parte de la oblea con alto contenido de silicio de grado solar (Huang et al., 2017; Huang & Tao, 2015), otro método en cambio propone la expansión solvotérmica junto con la descomposición térmica (SSTD) para la recuperación no destructiva de obleas de silicio de alta pureza de forma directa

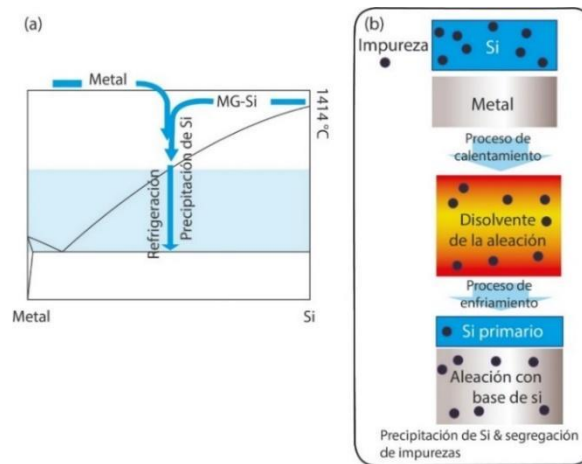
(Rakotoniaina et al., 2019; Xu et al., 2022), razón por la cual a continuación se define una alternativa, que son los procesos que pueden ser empleados para la purificación del silicio.

Entre los métodos de purificación más empleados se encuentra la solidificación direccional (Yuge et al., 2001), el método de intercambio de calor (HEM) (Khattak et al., 2002), la lixiviación junto con procesos hidrometalúrgicos (Xi et al., 2021), un sistema de fusión en un horno EBM a alta temperatura (Pires et al., 2005), el refinado con solvente a través de la cristalización fraccionada (Y. Li & Zhang, 2021), el enfoque de disolvente Si-Al (Yoshikawa & Morita, 2012). Así mismo, se han desarrollado procesos de purificación con fusión de Al-Si a un bajo costo para recuperar el silicio de grado solar utilizando técnicas de pulvimetalurgia (Gu et al., 2011).

El resumen del proceso se observa en la Figura 9, donde se detalla un diagrama del refinado con disolventes.

Figura 9

Diagrama del proceso de refinado con disolventes



Nota. Adaptado de Y.L.L.Z. (2019, 5 junio). Diagrama del proceso de refinado con disolventes.

3. Selección y propuesta de adaptación de la metodología de reciclaje a las condiciones del mercado colombiano

Las condiciones del mercado colombiano están determinadas por los datos históricos de la capacidad fotovoltaica instalada, que permiten ver el crecimiento que ha experimentado en los últimos años las instalaciones solares a gran escala en el país, los paneles poseen una vida útil de 30 años, después requieren ser tratados adecuadamente para su disposición final. Estos residuos son la oferta de paneles a reciclar en el futuro.

3.1 Selección de la metodología de reciclaje

Inicialmente, se realizó una encuesta a un grupo de investigadores en el área del reciclaje de paneles solares, la cual buscaba clasificar por niveles las metodologías descritas en el capítulo I, desde la más óptima a la menos óptima, mediante una matriz de priorización. Su objetivo era evaluarlas por medio de unos criterios definidos previamente, considerando los impactos de cada uno de los métodos empleados para recuperar materiales valiosos. Desafortunadamente esta encuesta requería un cierto número de evaluadores, los cuales eran los autores de los artículos empleados en la descripción de las metodologías y solo se obtuvo respuesta de algunos evaluadores, lo cual es una muestra insuficiente, razón por la cual se decidió no emplear esta matriz.

Por otro lado, debido a que este trabajo está enfocado en la recuperación de silicio de grado solar, que pueda ser reutilizado en la industria fotovoltaica, en toda la revisión bibliográfica

realizada sólo se encontraron dos metodologías que permiten recuperar silicio de alta pureza (grado solar), la primera se enfoca en un proceso de varios pasos que permite desmontar el módulo y recuperar la oblea de silicio con pureza de grado solar (Si-SoG) mediante la técnica conocida como monitoreo de la resistencia de hoja que maximiza su recuperación, con una tasa superior al 90 %, adicionalmente permite recuperar algunos metales mediante electroobtención secuencial con una pureza superior al 99 % (Huang et al., 2017; Huang & Tao, 2015).

La segunda metodología propone un proceso de expansión solvotérmica seguido por la descomposición térmica (SSTD) (Xu et al., 2021), para la recuperación no destructiva de obleas de silicio, empleando un método de purificación conocido como M.A.C.E (texturizado mediante grabado químico asistido por metal) que permite obtener celdas solares de alta pureza con una reflectividad muy baja (Xu et al., 2022). Por sus características y su aplicabilidad a cualquier tipo de módulo, esta fue la metodología seleccionada ya que permite obtener celdas solares de silicio de grado solar, con la ventaja que su proceso es aplicable a gran escala, principal razón por la cual fue seleccionada, mientras que la primera metodología solo es aplicable a pequeña escala, esto fue confirmado por uno de sus autores, el cual fue contactado por medio de correo electrónico (W. Huang, comunicación personal, 29 de marzo de 2022).

3.2 Condiciones del mercado colombiano para el reciclaje de módulos fotovoltaicos

El mercado colombiano de paneles solares tradicionalmente puede definirse en términos de la demanda y la oferta. Sin embargo, para el mercado del reciclaje fotovoltaico, se debe considerar la demanda histórica de paneles solares instalados hasta la actualidad como la oferta

futura de paneles a reciclar a mediano y largo plazo, este análisis, se enfoca en dos elementos fundamentales:

1. En la capacidad fotovoltaica instalada actualmente según la base de registros de la UPME (SIEL, 2022), para el periodo correspondiente 2015 - 2022. Con base en estos datos, se realiza la estimación del número de paneles solares existentes por año hasta la actualidad, posteriormente se estima el valor aproximado equivalente en toneladas métricas que representan estos módulos por año.

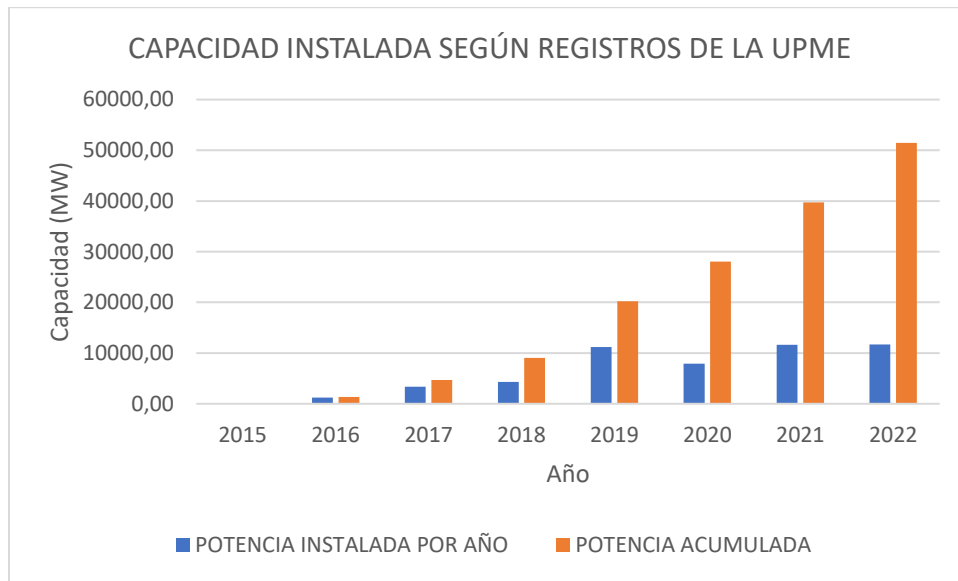
2. Basados en la información anterior, se realiza una proyección de los módulos fotovoltaicos en desuso, se plantean dos escenarios, uno por pérdidas regulares y otro por pérdidas tempranas. Este cálculo se realiza mediante la distribución de Weibull (S. Kumar & Sarkan, 2013), que es una herramienta estadística usada para el análisis de fallas de estos equipos.

3.3 Potencia fotovoltaica instalada actualmente en Colombia

Los proyectos fotovoltaicos se empezaron a consolidar en el país luego de la Ley 1715 de 2014, según la cual se generaban incentivos para el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía (Colombia, 2014). Para el año 2015 se instalaron 101 [MW] (UPME, 2015), mientras que para el año 2022 hay instalados 11.713,4 [MW] (UPME, 2022). En la Figura 10 se presentan los datos históricos de la potencia fotovoltaica instalada desde el año 2015 al 2022. Los datos son obtenidos del SIEL (sistema de información eléctrico colombiano) y registrados por la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (UPME), 2022), en donde se detalla la potencia de los proyectos solares vigentes por año en Mega Watts [MW].

Figura 10

Capacidad fotovoltaica instalada según registro de la UPME de 2015 a 2022



3.4 Estimación de la cantidad de módulos fotovoltaicos instalados en el periodo 2015 a 2022

Actualmente, no es posible determinar la cantidad exacta de módulos fotovoltaicos que se han instalado en el país debido a que no es información de conocimiento público y cada promotor conserva los datos de la cantidad de módulos adquiridos y su potencia nominal. Por tanto, se buscó una alternativa para estimar un valor aproximado de la cantidad de paneles existentes hoy en día. Se decidió contactar a algunos proveedores y comercializadores de módulos fotovoltaicos en el país, para elegir un módulo que sea muy comercializado en el mercado nacional, con la potencia nominal de este módulo se puede aproximar la cantidad de módulos fotovoltaicos instalados por año, al dividir la potencia anual instalada por la potencia nominal del panel (Sandoval, 2019). Es importante recordar que la aproximación es posible debido a que los módulos de silicio cristalino son unos de los más instalados en el país para proyectos a gran escala.

En la Tabla 9 se detalla la potencia nominal de los distintos paneles fotovoltaicos comercializados por distintas empresas.

Tabla 8

Paneles fotovoltaicos más comercializados en Colombia por algunas empresas

Empresa	Potencia nominal	Módulos
América Fotovoltaica (Distribuidor Mayorista)	545 [Wp]	Longi Solar modelo LR5-72HPH Módulo monocristalino JA Solar 400W Half-Cut 108 Células
Unergy	400 [Wp]	Trina solar mono perc 400 W Vertex S
Copérnico S.A.S	450 [Wp]	Panel Solar 450W Jinko Monocristalino
Emergente Energía Sostenible	540 [Wp]	Yingli Sola 540W monocristalino

Nota. Distribuidores y comercializadores paneles fotovoltaicos en Colombia (América Fotovoltaica, comunicación personal, 20 de mayo de 2022) (Unergy, comunicación personal, 20 de mayo de 2022) (Copérnico S.A.S, comunicación personal, 21 de mayo de 2022) (Emergente Energía Sostenible, comunicación personal, 20 de mayo de 2022).

Con base a la información de la Tabla 8, se opta por el módulo monocristalino JA Solar 400 [W] Half-Cut 108 celdas correspondiente a una potencia nominal unitaria de 400 [W_p] que es uno de los modelos para proyectos a gran escala comúnmente usados en Colombia en la actualidad. A continuación, se divide la potencia instalada entre los años 2015 y 2022 registrada en la Figura 10, entre la potencia nominal del módulo correspondiente a 400 [W_p], obteniendo la información registrada en la Tabla 9, en la que se detalla la cantidad de módulos y masa de paneles fotovoltaicos en toneladas métricas estimados por año.

Tabla 9

Estimación de la cantidad de módulos y la masa fotovoltaica instalada en Colombia

Año	Capacidad Instalada GE (MW)	Cantidad de Módulos Fotovoltaicos (Unidad)	Masa de paneles fotovoltaicos instalados (Toneladas métricas)
2015	101,00	252.500	5.428,75
2016	1.245,99	3'114.975	66.971,96
2017	3.369,81	8'424.525	181.127,28
2018	4.311,00	10'777.500	231.716,25
2019	11.162,25	27'905.625	599.970,93
2020	7.881,60	19'704.000	423.636,00
2021	11.658,80	29'147.000	626.660,50
2022	11.713,40	29'283.500	629.595,25

Nota. Capacidad instalada a gran escala [MW] (SIMEC, 2022)

Para realizar el cálculo de las toneladas métricas correspondiente a la masa de paneles fotovoltaicos instalados en el marco temporal (2015 a 2022), se utiliza el peso promedio del panel escogido, correspondiente a 21,5 [Kg], conociendo que una tonelada métrica equivale a 1.000 [Kg], se multiplica el número de módulos calculados de un determinado año por el peso promedio del panel dividido entre 1.000 [Kg], lo cual corresponde con el estimado de las toneladas métricas para cada año.

3.5 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es un modelo estadístico que permite predecir la tasa de fallos a lo largo del tiempo utilizando datos reales de una planta. Es una de las distribuciones más utilizadas por su versatilidad, su forma está basada en dos parámetros típicamente: El factor de forma (α) y la vida útil característica (β) (S. Kumar & Sarkan, 2013). La función de Weibull es un

modelo empírico que disminuye el riesgo de falla cuando el parámetro $\alpha < 1$, aumenta para $\alpha > 1$, y mantiene una tasa de fallo constante cuando $\alpha = 1$ (Pham, 2006). Los modelos de tasa de falla constante como el utilizado por el Ministerio de Ambiente de Japón (Ministry of the Environment, 2018) y el modelo de tasa de falla lineal (S. Kumar & Sarkan, 2013), no se tienen en cuenta debido a su poca fiabilidad y a las no linealidades presentes en los primeros años de vida de los paneles que deben ser consideradas.

3.6 Principales causas de fallos de los módulos fotovoltaicos

Hay tres clases de fallos típicos en los paneles fotovoltaicos que deben considerarse y se describen a continuación (IRENA and IEA-PVPS, 2016; IRENA And IEA PVPS, 2014):

- Los fallos prematuros, se producen hasta cuatro años después de haber sido instalados.
- Los fallos de vida media, los cuales se producen entre los cinco y 10 años después de su instalación.
- Los fallos por desgaste son definidos como los que se producen 12 años después de la instalación hasta llegar al final de la vida útil.

3.7 Escenarios de pérdidas tempranas y pérdidas regulares

Se plantean dos escenarios para la estimación del flujo de residuos hasta el año 2034, modelados según la distribución de Weibull, la cual se calcula mediante la Ecuación 1 (IRENA and IEA-PVPS, 2016). Esta función considera un factor de forma $\alpha = 5,3759$ para el escenario de pérdidas regulares y un $\alpha = 2,4928$ para el escenario de pérdidas tempranas, los cuales se obtiene a

partir de la literatura consultada (ver Tabla 10), con un tiempo medio de vida útil de los paneles conocido como $\beta= 30$ años, que es un valor aceptado por los distintos fabricantes de módulos (Dobra et al., 2020; IRENA and IEA-PVPS, 2016).

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

donde t corresponde a los años de vida del panel.

Tabla 10

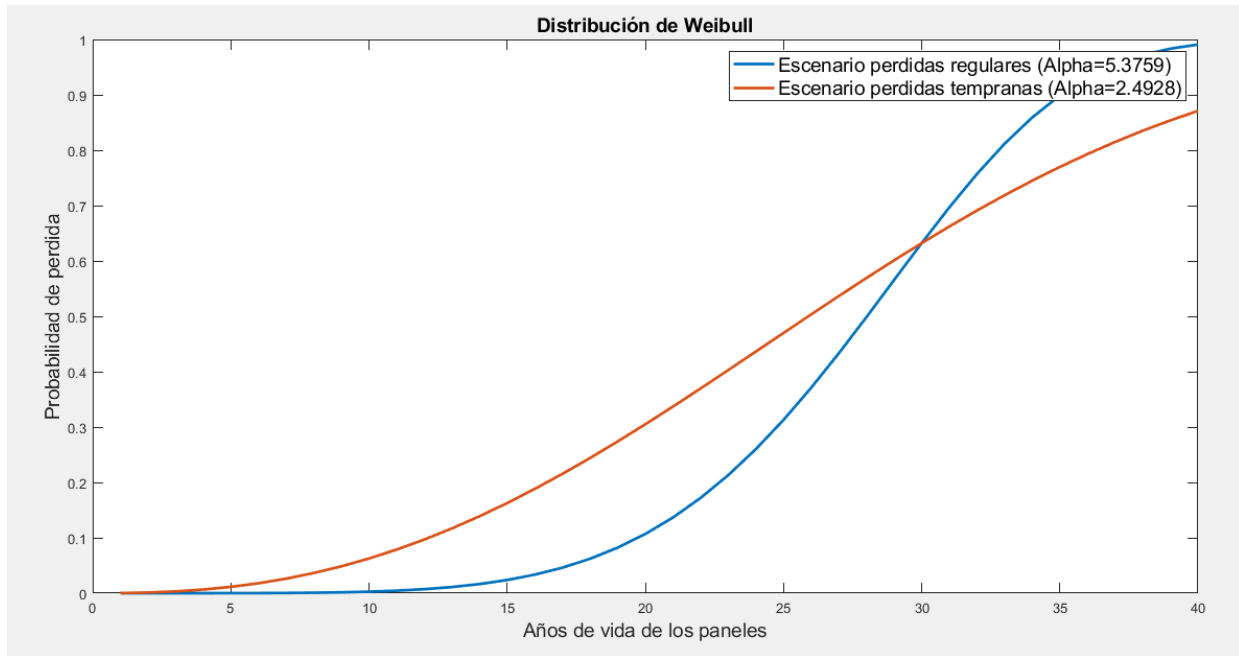
Parámetros encontrados en la literatura para la distribución de Weibull

Fuente	Factor de forma (α)	Vida media útil (β)
(J. Kuitche, 2015)	5,3759	30 años
(Zimmermann, 2013)	9,982	14,41 años
(IRENA and IEA-PVPS, 2016)	5,3759 (pérdidas regulares)	30 años
(IRENA and IEA-PVPS, 2016)	2,4928 (pérdidas tempranas)	30 años

En la Figura 11 se consideran los dos escenarios planteados mediante la función de distribución de Weibull (escenario de pérdidas regulares y pérdidas tempranas) según IRENA and IEA-PVPS (2016). La principal diferencia entre ambos escenarios es que el de pérdidas regulares solo considera fallos debido al envejecimiento de los paneles, mientras el escenario de pérdidas tempranas considera daños de instalación o transporte y los daños ocurridos durante la vida útil del módulo fotovoltaico.

Figura 11

Escenarios de pérdidas definidos mediante la distribución de Weibull



3.8 Pronóstico de residuos de paneles fotovoltaicos generados

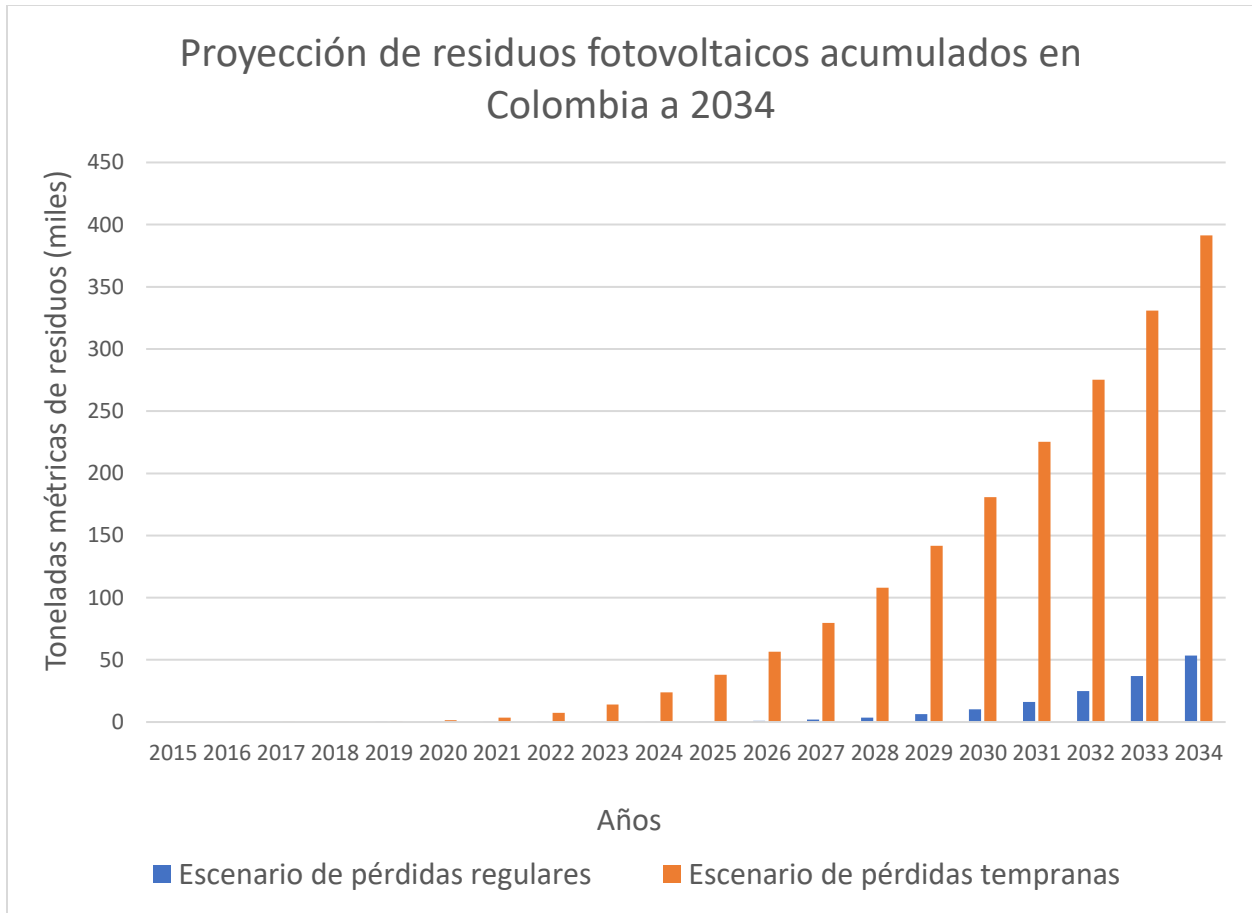
Para realizar el pronóstico de los residuos de paneles solares, se necesitan dos elementos importantes: La distribución de probabilidad de Weibull y la especificación de la masa de paneles instalados, calculadas anteriormente, esto permitirá crear escenarios al 2034 para estimar la cantidad de residuos generados.

El cálculo de los residuos se realiza multiplicando las toneladas métricas en un año específico por la distribución de probabilidad para todos los años siguientes. Luego el proceso se repite para cada uno de los años (2015 a 2022). Finalmente, la suma de los valores que se ubican en un mismo año (ejemplo los valores del 2030), permite obtener la cantidad de residuos proyectados para cada uno de los años (Dobra et al., 2020; IRENA and IEA-PVPS, 2016). Es

importante resaltar, que los valores obtenidos en ambos escenarios difieren ampliamente (ver Figura 12).

Figura 12.

Estimación del volumen de residuos acumulados en Colombia para el año 2034



El escenario de pérdidas regulares considera una proyección de residuos de 53.484,81 toneladas métricas para el año 2034 con un $\alpha= 5,3759$, mientras que el escenario de pérdidas tempranas considera un total de 391.283,84 toneladas métricas con un $\alpha= 2,4928$. Ambos escenarios difieren ampliamente en los valores estimados. Sin embargo, la cantidad real de residuos podría ubicarse entre ambos valores, y puede considerarse como un escenario factible

debido a las inversiones realizadas recientemente en proyectos fotovoltaicos a gran escala en el país. La tabla con los valores de los datos se puede consultar en el anexo B.

3.9 Adaptación de la metodología seleccionada a los escenarios propuestos

En esta sección se presenta la adaptación de la metodología seleccionada. El proceso descrito puede ser consultado más ampliamente en (Xu et al., 2022). Este se basa en el método de expansión solvotérmica junto con la descomposición térmica “SSTD”. La metodología se describe por etapas para mayor facilidad del lector.

El proceso comienza con una unidad funcional, similar a la descrita en la Tabla 1, esta puede ser modificada según la cantidad de paneles a tratar. El primer paso del proceso de reciclaje consiste en la etapa de desmantelamiento mecánico, en la cual se remueve el marco de aluminio y la caja de conexiones, seguidamente se realiza el proceso de recuperación de las celdas intactas descrito por (Xu et al., 2021), con una tasa de integridad de hasta el 86,11 %, el cual consta de tres pasos intermedios descritos a continuación:

1. Inicialmente se emplea un pretratamiento en un reactor solvotérmico (CF-3000L, Weihai Chem-Equip Machinery Co., 2022) con un volumen de 3.000 [L], en el cual se emplean una mezcla de vapores de solventes orgánicos de tolueno (0,2 [M]) y etanol (0,2 [M]) con una presión entre 1,2 y 1,4 [MPa], lo cual permite hinchar el EVA y presurizarlo para formar un canal de liberación del gas. Este canal se forma entre las celdas de silicio y el vidrio, el proceso se realiza a 190 °C durante 2 h, permitiendo la disolución del EVA casi por completo (Xu et al., 2021). Además, el etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) permite eliminar la lámina posterior por adelantado, descomponiendo la estructura Teldar/PET/Teldar mediante la glucólisis del PET. Este proceso

evita el escape de gases con componentes fluorados durante la etapa de combustión posterior (Xu et al., 2021, 2022).

2. Después es empleado un proceso de descomposición/combustión donde el módulo pretratado se coloca en un horno de mufla (TE-M12D, CIS-LAB Co, 2022) para eliminar el EVA residual. Este proceso se realiza a 500 °C durante media hora (Xu et al., 2021).

La clave del proceso SSTD es hinchar el EVA para construir canales de liberación de gas. Debido a la introducción de etanol, se produce una despolimerización de la lámina posterior mediante la mezcla de solventes (touleno-etanol) (Xu et al., 2021). El principal producto de la reacción de despolimerización es el monómero de tereftalato de dietilo $C_{12}H_{14}O_4$ que es considerado como el producto de la degradación de la glucólisis del PET (Xu et al., 2021), permitiendo eliminar la hoja posterior de Teldar. Además no contiene sustancias nocivas para el medioambiente (ThermoFisher, 2021), no es tóxico ni cancerígeno, se degrada en las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales (Armacell, 2010).

El proceso permite recuperar las obleas de silicio intactas, con una tasa de recuperación del 86,11 % (Xu et al., 2021), sin embargo, la cantidad de impurezas presentes en su superficie es considerablemente alta. Para lograr obleas de silicio de alta pureza se emplean dos etapas adicionales (prepurificación y ultrapurificación).

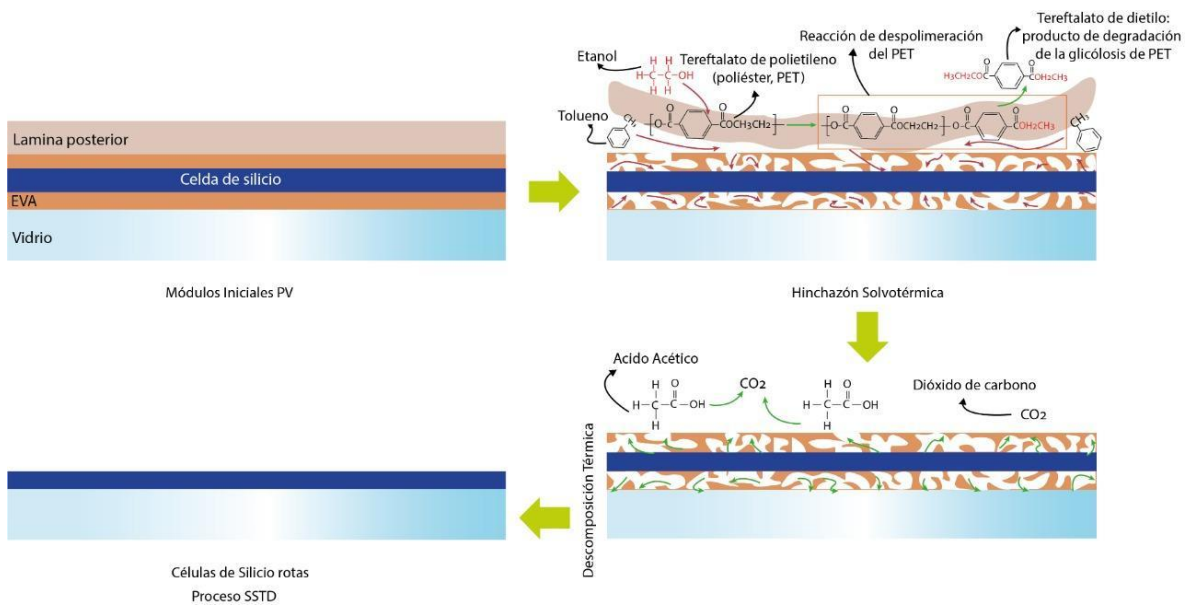
En la etapa de prepurificación, las obleas recuperadas son tratadas mediante procesos de grabado secuencial, en el que se emplean HCL/HNO₃/HF. La solución con HCL con una concentración de 18 - 24 % durante 10 a 15 minutos a temperatura ambiente permite remover completamente el electrodo de aluminio (Xu et al., 2022). Posteriormente se sumerge la oblea en HNO₃ en una concentración de 30 % en peso durante 10 minutos a 50 °C para retirar el electrodo de plata. Por último, el HF con una concentración 20 % - 30 % durante 5 minutos a temperatura

ambiente permite eliminar la capa antirreflectante (AR) (Xu et al., 2021, 2022). De este proceso se obtienen las obleas PP (obleas prepurificadas).

En la Figura 13 se detalla una representación gráfica del proceso de expansión solvotérmica junto a la descomposición térmica descrito, el cual permite recuperar la oblea de silicio intacta, con un nivel de pureza de grado solar empleando procesos de purificación posteriores.

Figura 13

Representación gráfica del proceso

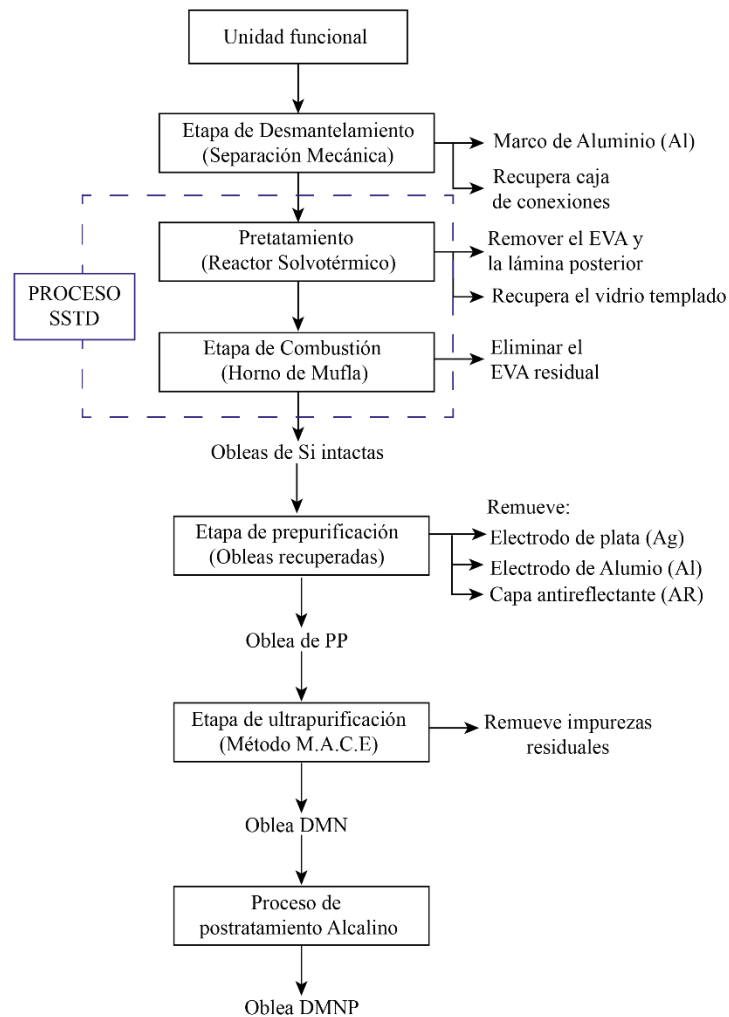


Nota. Adaptado de Xu et al. (2021). Método de recuperación de celdas de silicio intactas de los módulos por el proceso SSTD.

En la Figura 14 se detalla el proceso de adaptación de la metodología descrita anteriormente, donde se menciona cada una de las etapas y técnicas empleadas. Se detalla en un recuadro punteado el proceso de expansión solvotérmica junto a la descomposición térmica “SSTD”.

Figura 14

Descripción de la metodología seleccionada



Una etapa de ultrapurificación es requerida, se emplea un método reciente en este campo conocido como M.A.C.E (texturizado mediante grabado químico asistido por metal) que es empleado para eliminar las impurezas residuales y fabricar texturas antirreflectantes para la oblea de PP (prepurificación) como: Textura micro/nano (DMN), textura de nanocables, de nanoporos y una estructura piramidal rectangular invertida (Xu et al., 2022), empleando catalizadores metálicos como Cu^+ y Ag^+ . El grabado emplea HF (4,6 [M]) y H_2O_2 (0,55 [M]) durante 5 minutos

a temperatura ambiente (Xu et al., 2021, 2022). Este es un proceso sencillo con un bajo consumo de energía.

De la etapa anterior se obtiene una oblea de PP con una textura DMN rugosa, lo que se traduce en una eficiencia energética reducida (Ye et al., 2014). Para obtener una superficie más uniforme y lisa, la oblea es tratada mediante un proceso de postratamiento alcalino que permite obtener una oblea DMNP (Xu et al., 2022), con una superficie suave y una baja reflectividad, para esto se emplea una solución mixta de KOH (0,2 [M]) y alcohol isopropílico (IPA) al 10% en volumen a 50 ° C durante 90 segundos (Xu et al., 2022). Finalmente, las obleas obtenidas son lavadas y secadas con agua y nitrógeno (Xu et al., 2022).

El espesor promedio de la oblea recuperada mediante M.A.C.E es de 165,71 μm , con una reflectividad del 13,99 % (Xu et al., 2022), que es menor al de las obleas comerciales de silicio cristalino. El tratamiento de ultrapurificación y postramiento alcalino anteriormente descritos, garantizan una pureza de silicio de grado solar requerida para las obleas recuperadas, eliminando casi por completo las impurezas residuales en su superficie (Xu et al., 2022). Adicionalmente, el precio de producción de este proceso es inferior al de otros procesos existentes para la recuperación de obleas (Cucchiella et al., 2015; D'Adamo et al., 2017; Deng et al., 2019) o al proceso de producción industrial estándar (Woodhouse et al., 2019).

3.10 Estimación de la cantidad de paneles que pueden ser reciclados simultáneamente

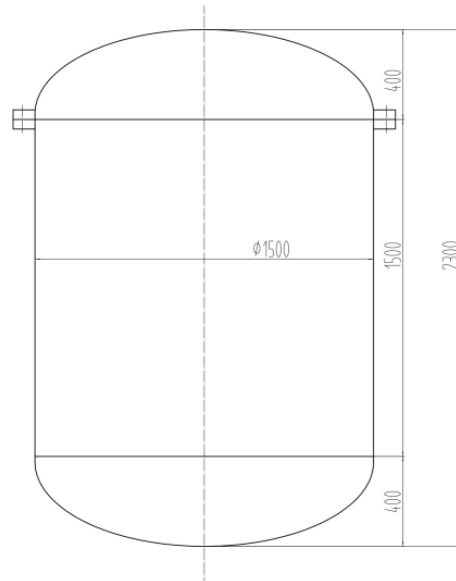
Se realizó una aproximación de la cantidad de módulos fotovoltaicos que podrían tratarse simultáneamente dentro del reactor, este cálculo se realizó con base en las dimensiones del panel de 400 [W_p] seleccionado, que corresponden a 1.722 [mm] x 1.134 [mm] x 30 [mm]. La

aproximación consiste en un dibujo a escala 1:10, del esquema del reactor, las dimensiones fueron brindadas por el fabricante (F. Liu, comunicación personal, 20 de mayo de 2022) en el cual se tiene un diámetro de 1,5 [m], una altura de 1,5 [m] y unos casquetes con forma elipsoidal de 1,5 [m] x 0,4 [m].

En la Figura 15 se detalla el esquema del reactor brindado por el fabricante. Las dimensiones brindadas están en milímetros [mm], el reactor posee una forma cilíndrica en su parte central, con unos casquetes en la parte superior e inferior, con un volumen de trabajo de 3000 [L] y un volumen total de 3500 [L].

Figura 15

Esquema del reactor brindado por el fabricante



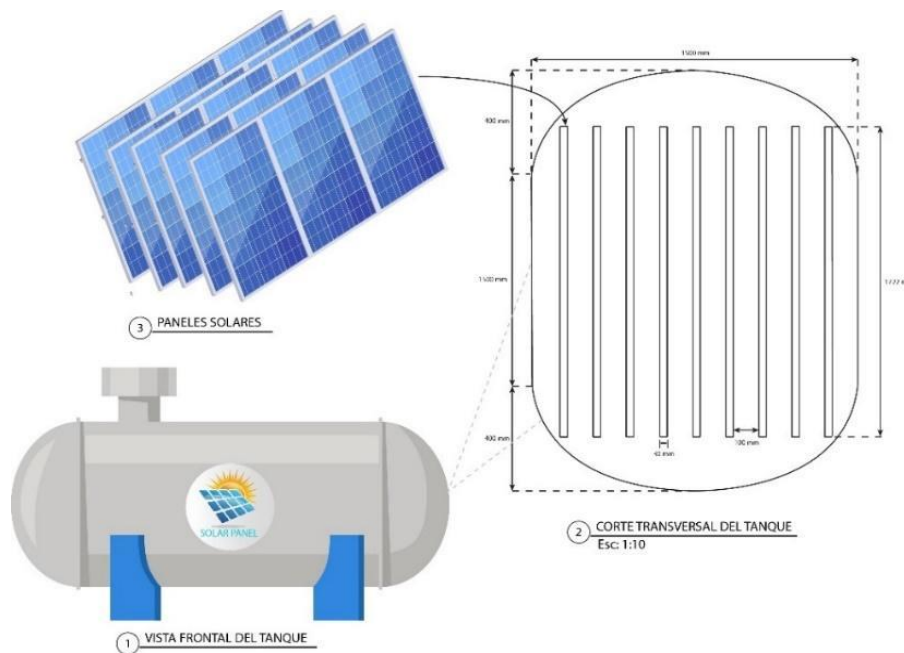
Nota. Las dimensiones están en milímetros (F. Liu, comunicación personal, 25 mayo de 2022).

La aproximación realizada en la Figura 16 permite determinar que en total se pueden ubicar 9 módulos fotovoltaicos dentro del reactor. El primer módulo se ubica en el centro del reactor,

luego dejando un espacio de 10 [cm] entre ellos (sugerido por el fabricante) se ubican los siguientes módulos, en total cuatro a cada lado. Los módulos son pretratados simultáneamente en el interior del reactor mediante vapores orgánicos y altas presiones, durante 2 horas. Es importante aclarar, que para módulos de dimensiones más grandes se requieren fabricar reactores más grandes, aunque se recomienda trabajar con reactores pequeños que tengan volúmenes de trabajo entre 3.000 [L] y 5.000 [L] para este proceso en específico.

Figura 16

Representación gráfica de la estimación realizada



Es de aclarar que la suposición realizada considera que la temperatura dentro del reactor se distribuye homogéneamente, no se presentan gradientes de temperatura internos, todos los paneles logran calentarse uniformemente a la temperatura del proceso que es 190 °C. Sin embargo, para verificar si esta suposición es cierta, se recomienda, en un trabajo posterior realizar un análisis

termodinámico del comportamiento del reactor mediante una simulación, ya que este análisis se sale del alcance de este trabajo de grado.

En la siguiente etapa del proceso, el horno de mufla es usado para el tratamiento térmico. Este equipo posee unas dimensiones internas de 20 [cm] x 25 [cm] x 20 [cm] (cavidad interior) y una capacidad de 10 [L], lo cual permite tratar múltiples obleas recuperadas de forma simultánea. Las obleas pueden ser ubicadas con una separación de 5 [mm] a 10 [mm] entre ellas, ya que estas tienen unas dimensiones superficiales de 182 [mm] x 91 [mm] aproximadamente y un espesor muy pequeño.

La estimación realizada considera la duración del proceso 3h con 30 minutos aproximadamente, incluyendo el tiempo para el desmontaje mecánico del módulo fotovoltaico, que es aproximadamente 12,5 minutos por módulo cuando se realiza manualmente (P. Dias et al., 2021). Igualmente, la limitante del proceso es el reactor que permite tratar solo 9 módulos de 400 [Wp] simultáneamente con un volumen de trabajo de 3000 [L]. Suponiendo un horario laboral de 8 horas se podrían reciclar 27 módulos de 400 [Wp] diariamente con un solo reactor, esto permite tratar 810 paneles mensuales, el proceso puede escalarse con el uso de más equipos, que permitan tratar una cantidad considerable de módulos, teniendo en cuenta que el mercado colombiano se encuentra todavía en expansión.

En base a la Ecuación 2, se pueden calcular la cantidad de módulos necesarios a reciclar según la estimación realizada en la Figura 12.

$$Cantidad\ Módulos = \frac{Masa\ del\ panel\ [Ton\ Métricas] * 1000\ [Kg]}{Peso\ del\ panel\ [Kg]} \quad (2)$$

En el escenario de pérdidas regulares se estima un total de 53.484,81 toneladas métricas de residuos para el año 2034, que es equivalente a 2'487.666 paneles en un año o 207.306 paneles mensuales. En el escenario de pérdidas tempranas se estima un total de 391.283,84 toneladas

métricas de residuos en ese mismo año, equivalentes a 18'199.249 paneles por año o 1'516.605 paneles por mes.

Conviene destacar, que la metodología seleccionada no presenta limitación económica, ni restricciones por los insumos químicos empleados. Sin embargo, el costo energético asociado a la factura eléctrica puede suponer una barrera a nivel local, que requiere un estudio adicional que no se aborda en este trabajo de grado.

El estudio realizado considera solo los datos disponibles en la metodología base, para determinar las concentraciones de tolueno y etanol empleadas, así como la variación en la presión interna del reactor en el proceso descrito en la Figura 16, se deben realizar investigaciones técnicas posteriores a escala de laboratorio que permitan establecer los valores finales. Así mismo, se debe evaluar si es posible tratar una mayor cantidad de paneles simultáneamente al disminuir el espacio entre ellos. Un trabajo de laboratorio permitirá determinar los valores exactos y estimar la cantidad de equipos que se requieren para reciclar una parte o la totalidad de las toneladas métricas de residuos proyectados por año hasta el 2034.

4. Estimación del consumo energético durante el proceso de reciclaje del silicio de grado solar.

El consumo energético del proceso de reciclaje por el método de expansión solvotérmica junto con la descomposición térmica "SSTD", se centra en el gasto eléctrico asociado a los equipos empleados, no se considera otras formas de energía empleadas durante el proceso descrito en la

Figura 14, que deben ser abordadas en un trabajo posterior, ya que está fuera del alcance de este trabajo de grado.

4.1 Descripción del consumo energético por etapas.

El proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos descrito en la Figura 14, aborda una serie de etapas que conllevan un consumo energético asociado. Algunas etapas pueden estimarse a partir de literatura existente sobre otros procesos de reciclaje, que aborden etapas en condiciones similares, como en el caso del desmantelamiento del módulo fotovoltaico. Sin embargo, las etapas del proceso “SSTD” deben obtenerse a partir de las características de los equipos empleados (potencia y consumo eléctrico), tanto para el reactor como para el horno de mufla. En este caso el reactor solvotermico (Weihai Chem-Equip Machinery Co., 2022), permite reciclar 27 módulos fotovoltaicos diariamente, así mismo, el horno de mufla (TE-M12D, CIS-LAB Co, 2022), permite tratar múltiples obleas simultáneamente.

El consumo energético de los procesos de prepurificación y ultrapurificación no es considerado, ya que el análisis acá presentado se centra en el consumo de energía eléctrica. Estos procesos son químicos y requieren un análisis distinto que no se aborda en este trabajo de grado. Este capítulo se centra en realizar una estimación del consumo de energía eléctrica que se requiere durante el proceso de reciclaje por el método “SSTD” mencionado en la Figura 14. Cabe señalar que no se considera la energía empleada en trasladar los módulos desde los puntos de recogida hasta la planta donde van a ser tratados ya que esto haría parte de un estudio adicional de LCCA (Análisis del costo del ciclo de vida) que no se considera en este trabajo de grado.

4.1.1 Etapa de desmantelamiento

La etapa de desmantelamiento puede ser realizada manualmente o mediante un robot cartesiano de 3 ejes, que recorta y ayuda a remover el marco de aluminio, posteriormente la caja de conexiones y los cables son removidos de forma manual, luego se clasifican y son separados para ser reciclados (Latunussa et al., 2016).

Tomando en cuenta la unidad funcional descrita en la Tabla 1, que está compuesta con 1,66 módulos, se tiene que, para recuperar el equivalente a 1 [Kg] de Silicio, según Ilias et al., (2018), la etapa de desmantelamiento mecánico consume aproximadamente 7,2 [kW], el equivalente a 2 [kWh/módulo] o 3,3 [kWh/kg] de silicio recuperado.

En este caso, si son tratados 9 módulos simultáneamente en el reactor, eso implica un aproximado de 18 [kWh] para remover el marco de aluminio y caja de conexiones de todos los módulos. Como el proceso se repite tres veces al día, se reciclan diariamente 27 módulos, el gasto energético total sería de 54 [kWh].

4.1.2 Etapa de tratamiento solvotérmico “SSTD”

En este caso, la estimación del consumo energético de cada uno de los equipos se realiza a través de las especificaciones solicitadas directamente al fabricante. A partir de estas se obtiene la potencia nominal [kW] o el consumo en kilovatios hora [kWh] del equipo.

La potencia nominal del reactor solvotérmico: “China 3000L High Pressure Stainless Steel Large Reactor” de la empresa “Weihai Global Chemical Machinery MFG Co., Ltd”, es un reactor de 90 [kW]. Este valor se toma de las especificaciones brindadas en la página web de Alibaba (CF-

3000L, 2022). Sin embargo, la gerente de ventas de la empresa, Feeling Liu indica que se debe descontar 15 [kW] que se usan para el motor de mezclado (F. Liu, comunicación personal, 20 de mayo de 2022), ya que el reactor en cuestión no utiliza mezclador (CF-3000L). La estimación da un consumo total aproximado de 75 [kWh] (empleado para la calefacción por calentadores eléctricos automáticos dentro de la camisa del reactor controlado por un PID).

Si el proceso de tratamiento solvotérmico tiene una duración de 2 horas, y según la estimación realizada se pueden tratar 9 módulos simultáneamente, el consumo energético se calcula multiplicando los 75 [kWh] por el número total de horas empleadas. En este caso serían 6 horas diarias, correspondiente a la duración total de los 3 procesos que se ejecutarían en la jornada laboral por día, lo que daría un consumo total de 450 [kWh], que sería el consumo diario del proceso.

4.1.3 Etapa de tratamiento térmico (horno de mufla)

El tratamiento térmico posterior es realizado en el horno de mufla: “TE-M20D” de la empresa Terlab S.A (CIS-LAB Co, 2022) , el cual tiene una potencia nominal de 2,5 [kW] y un consumo de corriente de 11,36 [A]. El consumo del equipo será de 26 [A] a 120 [V] en lo que llega a una temperatura seleccionada, con un comportamiento de rampa lineal en el régimen transitorio (muy poca duración) y una vez llega al estado estable su consumo será de 2,5 [kWh]. En la temperatura seleccionada va a oscilar el consumo, en este caso se asume que el horno se precalienta previamente a la temperatura deseada y las obleas recuperadas son introducidas durante media hora (duración del proceso), las obleas tendrán una separación de 5 [mm] entre ellas.

El consumo energético puede ser estimado como los 2,5 [kWh], multiplicado por la cantidad de horas de uso, cada proceso dura media hora, esto da un consumo de 1,25 [kWh]. El consumo del proceso por día será 3 veces los 1,25 [kWh], obteniendo un total de 3,75 [kWh].

4.2 Estimación del consumo energético por etapas

El consumo total del proceso de reciclaje sin incluir las etapas de purificación se puede determinar como la suma del consumo de cada una de las etapas individuales mencionadas anteriormente, exceptuando las que no tienen un consumo eléctrico, como prepurificación y ultrapurificación. Particularmente en el caso de estudio, el consumo energético estará dado por la etapa de desmantelamiento, el pretratamiento en el reactor solvotérmico y el tratamiento posterior en el horno de mufla.

En la Tabla 11 se describe el consumo energético por etapas del proceso propuesto en la Figura 14.

Tabla 11

Estimación del consumo energético del proceso propuesto por etapas

Etapas del proceso	Consumo estimado de energía (kWh) por día laboral.
Etapa de desmantelamiento	54 [kWh]
Etapa de tratamiento solvotérmico “SSTD”	450 [kWh]
Etapa de tratamiento térmico	3,75 [kWh]
Total	507,75 [kWh]

Como se observa en la Tabla 11, el consumo energético estimado para el proceso de reciclaje empleando el tratamiento solvotérmico “SSTD” es de aproximadamente 507,75

[kWh/día], es un consumo energético alto comparado con el consumo de energía de procesos como FREL P, que emplean 113,55 [kWh] por cada 1.000 [kg] de residuos de paneles recuperando materiales de baja pureza como el vidrio contaminado (con impurezas), lodos metálicos y cenizas residuales que son residuos peligrosos, además genera óxidos nitrosos que afectan el medio ambiente (Latunussa et al., 2016). Sin embargo, el proceso “SSTD” recupera directamente las obleas de silicio sin ningún daño con una mayor fiabilidad y un impacto ambiental menor que el del proceso “FREL P” y otros métodos termoquímicos, con un alto grado de pureza, mientras “FREL P” recupera un silicio de grado metalúrgico, que requiere procesos tradicionales de purificación posteriores costosos.

En la Tabla 12 se compara el consumo energético del proceso propuesto en la Figura 14 con el proceso FREL P.

Tabla 12

Estimación del consumo energético del proceso “SSTD”

Consumo energético estimado	
método expansión solvotérmica “SSTD”	método FREL P
507,75 [kWh]	113,55 [kWh]

Nota. (Latunussa et al., 2016)

A partir de la información, se deduce que el consumo energético del proceso de expansión solvotérmica “SSTD” depende directamente de la cantidad de módulos fotovoltaicos a reciclar, así como del gasto de energía por hora del reactor, que se relaciona directamente con su potencia nominal (a mayor volumen de trabajo, mayor es la potencia consumida), mientras que el menor consumo de energía lo tiene el horno de mufla. La metodología de reciclaje descrita presenta una alta eficiencia para la recuperación de obleas de silicio intactas, requiriendo solo dos procesos

posteriores de purificación para obtener una oblea de alta pureza. Sin embargo, se debe realizar una investigación a escala de laboratorio para encontrar una forma eficiente de disminuir el consumo energético.

5. Conclusiones

El reciclaje de silicio de grado solar proveniente de módulos fotovoltaicos de desecho es una oportunidad para innovar en el desarrollo de procesos de reciclaje, que permitan reutilizar materiales valiosos, como el silicio de alta pureza que pueda ser empleado directamente en la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos. A continuación, se detallan las conclusiones más importantes:

- Las metodologías de reciclaje estudiadas abordan distintos métodos (mecánicos, térmicos, químicos, combinados y modernos) empleados para los procesos de recuperación de silicio de grado metalúrgico principalmente, en forma de polvo u oblea, lo cual requiere de procesos de purificación tradicionales con un alto costo económico y energético como: La solidificación direccional, el método de intercambio de calor (HEM), el refinado con solventes por cristalización fraccionada y el enfoque de disolvente (Si-Al), para obtener silicio de grado solar, razón por la cual estas técnicas son poco utilizadas en los procesos de reciclaje actualmente.

- De las metodologías encontradas en la literatura, solo dos permiten obtener silicio de grado solar de forma directa, una es aplicable a pequeña escala: “A simple green process to recycle Si from crystalline-Si solar cells” (Huang & Tao, 2015) y “Strategy and technology to recycle

wafer-silicon solar modules” (Huang et al., 2017) que emplea dos tecnologías: la electroobtención secuencial y el monitoreo de la resistencia de la hoja. La segunda puede ser empleada a gran escala: “Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition” (Xu et al., 2021) y “A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module” (Xu et al., 2022) que emplea un método de expansión solvotérmica junto a la descomposición térmica “SSTD” con un proceso adicional de grabado secuencial (prepurificación) y un método MACE (ultrapurificación) recuperando en ambos casos la oblea con un alto grado de pureza.

- Debido a la complejidad de los procesos de reciclaje actuales y el objetivo de reciclar la mayor cantidad de paneles posibles, se selecciona el método de expansión solvotérmica junto a la descomposición térmica “SSTD” aplicable a gran escala, considerando las condiciones del mercado colombiano, el proceso busca la recuperación de múltiples obleas de silicio de alta pureza aceptables para la industria fotovoltaica, contribuyendo a la economía circular y al cuidado del medio ambiente.

- Las condiciones del mercado colombiano consideradas para el proceso de reciclaje seleccionado corresponden a las proyecciones de generación de residuos fotovoltaicos hasta el año 2034 (Distribución de Weibull), según los datos tomados de los registros históricos de generación de la UPME desde 2015 hasta el año 2022. La metodología empleada, permite reciclar una alta cantidad de paneles en un corto periodo de tiempo. El proceso puede ser lucrativo si se realiza con múltiples equipos para una cantidad de módulos significativa. Sin embargo, las concentraciones de los solventes orgánicos empleados, la presión del reactor y la temperatura deben ajustarse mediante un análisis termodinámico del comportamiento del reactor, empleando una simulación

que permita determinar las condiciones óptimas de operación del proceso. Este análisis debe abordarse en un trabajo posterior, ya que está fuera del alcance de este trabajo de grado.

- La estimación del consumo energético se realiza para las distintas etapas del proceso de reciclaje: desmantelamiento mecánico consume 54 [kWh], el reactor solvotérmico consume 504 [kWh], y el horno de mufla consume 3,75 [kWh] para un consumo total de 507,75 [kWh]. Este consumo debe ser evaluado a profundidad, para incluir mejoras en la eficiencia del proceso, que disminuyan el consumo energético al mínimo, ya que el costo de la factura eléctrica puede suponer una barrera en algunas regiones del país, sin los incentivos gubernamentales adecuados.

- Las futuras investigaciones para el proceso de reciclaje descrito requieren de una validación experimental en laboratorio, antes de su implementación a gran escala, considerando que la metodología se adaptó para el reciclaje de múltiples módulos simultáneamente, pero algunas condiciones de operación descritas corresponden al trabajo inicial realizado para un único panel comercial.

Referencias

- Akanksha Tyagi, N. K. (2021). *Akanksha Tyagi and Neeraj Kuldeep Learnings from Global Best Practices How India can Manage Solar Photovoltaic Module Waste Better Centre for Energy Finance*.
- 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>
- Armancell. (2010). Ficha de datos de seguridad Ficha de datos de seguridad. *Carl Roth*, 2(1907), 2–7. https://hybris-static-assets-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/sys-master/pdfs/h96/hc3/9673630253086/EN_ST-WB-MSDS-2601489-1-1-1.PDF
- 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>
- Badiee, A., Ashcroft, I. A., & Wildman, R. D. (2016). The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.008>
- Bagnall, D. M., & Boreland, M. (2008). Photovoltaic technologies. *Energy Policy*, 36(12), 4390–4396. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.070>
- Bahrami, A., Mohammadnejad, S., & Soleimaninezhad, S. (2013). Photovoltaic cells technology: Principles and recent developments. *Optical and Quantum Electronics*, 45(2), 161–197. <https://doi.org/10.1007/s11082-012-9613-9>

- 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>
- Bogust, P., & Smith, Y. R. (2020). Physical Separation and Beneficiation of End-of-Life Photovoltaic Panel Materials: Utilizing Temperature Swings and Particle Shape. *JOM*, 72(7), 2615–2623. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04197-2>
- Camargo, P. S. S., Domingues, A. D. S., Palomero, J. P. G., Kasper, A. C., Dias, P. R., & Veit, H. M. (2021). PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING: THERMAL TREATMENT TO DEGRADE POLYMERS AND CONCENTRATE VALUABLE METALS. *Detritus*, 16, 48–62. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15119>
- CF-3000L, Weihai Chem-Equip Machinery Co., L. (2022). *China 3000l High Pressure Stainless Steel Large Reactor - Buy High Pressure Stainless Steel Large Reactor,High Pressure Stainless Steel Reactor,High Pressure Steel Reactor Product on Alibaba.com*. https://www.alibaba.com/product-detail/China-3000L-High-Pressure-Stainless-Steel_1600262585930.html
- CF-3000L. (2022). *China 3000l High Pressure Stainless Steel Large Reactor - Buy High Pressure Stainless Steel Large Reactor,High Pressure Stainless Steel Reactor,High Pressure Steel Reactor Product on Alibaba.com*. https://www.alibaba.com/product-detail/China-3000L-High-Pressure-Stainless-Steel_1600262585930.html
- 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). <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>
- Chen, W. S., Chen, Y. J., Yueh, K. C., Cheng, C. P., & Chang, T. C. (2020). Recovery of valuable metal from Photovoltaic solar cells through extraction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 720(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/720/1/012007>
- Chitra, Sah, D., Lodhi, K., Kant, C., Saini, P., & Kumar, S. (2020). Structural composition and thermal stability of extracted EVA from silicon solar modules waste. *Solar Energy*, 211, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.039>
- Collins, K., & Anctil, A. (2014). Photovoltaic waste characterization with environmental considerations. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014*, 1419–1423. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925183>
- Colombia, C. De. (2014). LEY 1715. *Presidencia de La Republica*, May, 26. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/22602-11506.pdf>
- Commission of the European Communities. (2003). *DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. 1–15.
- Cosnita, M., Cazan, C., Duta, A., & Visa, I. (2018). *Recycling Silicon-PV Modules in Composites with PVC, HDPE and Rubber Wastes* (pp. 375–394). https://doi.org/10.1007/978-3-319-63215-5_27
- Cristaldi, L., Faifer, M., Lazzaroni, M., Khalil, M. M. A. F., Catelani, M., & Ciani, L. (2015). Diagnostic architecture: A procedure based on the analysis of the failure causes applied to

- photovoltaic plants. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 67, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.023>
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C., & Rosa, P. (2016). A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 64, pp. 749–760). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.057>
- Daily Wealth (s.f.). Estructura general de un módulo de silicio cristalino. Special Report: Solar Technology. <https://www.wealthdaily.com/report/solar-technology/1409>
- Danz, P., Aryan, V., Möhle, E., & Nowara, N. (2019). Experimental study on fluorine release from photovoltaic backsheet materials containing PVF and PVDF during pyrolysis and incineration in a technical lab-scale reactor at various temperatures. *Toxics*, 7(3), 47. <https://doi.org/10.3390/toxics7030047>
- Del Pero, F., Delogu, M., Berzi, L., & Escamilla, M. (2019). Innovative device for mechanical treatment of End of Life photovoltaic panels: Technical and environmental analysis. *Waste Management*, 95, 535–548. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.037>
- Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 109, pp. 532–550). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
- Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., & Veit, H. (2017). Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 60, 716–722. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.036>
- Dias, P. R., Shmidt, L., Spier, G., Bilbao, J., & Veit, H. M. (2019). Recycling waste solar modules using organic solvents. *Heraklion 2019- 7th International Conference on Sustainable Solid*

- Waste Management*, 8–11.
http://uest.ntua.gr/heraklion2019/proceedings/pdf/74_HERAKLION_2019_Dias_etal.pdf
- Dias, P., Schmidt, L., Gomes, L. B., Bettanin, A., Veit, H., & Bernardes, A. M. (2018). Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 176–186. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0173-5>
- 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>
- Dobra, T., Vollprecht, D., & Pomberger, R. (2022). Thermal delamination of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management and Research*, 40(1), 96–103. <https://doi.org/10.1177/0734242X211038184>
- Dobra, T., Wellacher, M., & Pomberger, R. (2020). End-of-life management of photovoltaic panels in Austria: Current situation and outlook. *Detritus*, 10(June), 75–81. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13915>
- Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67(1–4), 397–403. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00308-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00308-1)
- Duflou, J. R., Peeters, J. R., Altamirano, D., Bracquene, E., & Dewulf, W. (2018). 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>

- D'Adamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (2017). Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>
- ElektroG. (2005). *Bundesgesetzblatt (German Parliament Official Journal)*. https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//%2A%5B%40attr_id%3D%27bgbl105s0762.pdf%27%5D#__bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl105s0762.pdf%27%5D__1643122926633
- European Parliament and The Council of European Union. (2012). DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) (Text with EEA relevance). In *Journal of the European Union: Vol. 197/38*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:en:PDF%0Ahttps://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- 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>
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Pérez, O. (2019). Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants. *Energy*, 183, 825–836. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.185>
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>

- Gu, X., Yu, X., & Yang, D. (2011). Low-cost solar grade silicon purification process with Al-Si system using a powder metallurgy technique. *Separation and Purification Technology*, 77(1), 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.11.016>
- Guo, Q. (2017). *A Framework for Optimal Decision Making of a Photovoltaic Recycling Infrastructure Planning - ProQuest*. <https://www.proquest.com/openview/2411acd77172654684f5ea5b12bb6ff2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M., Deceglie, M., Ravikumar, D., Remo, T., Cui, H., Sinha, P., Libby, C., Shaw, S., Komoto, K., Wambach, K., Butler, E., Barnes, T., & Wade, A. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 5(7), 502–510. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0645-2>
- 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>
- 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. (2017). Consultation on silicon panel recycling Jorge Moreno. [Correo electrónico]
- Ilias, A. V., Meletios, R. G., Yiannis, K. A., & Nikolaos, B. (2018). Integration & assessment of recycling into c-Si photovoltaic module's life cycle. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11(3), 186–195. <https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1428833>

- 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
- IRENA AndIEA PVPS. (2016). *IRENA andIEA PVPS (2016) - End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. https://www.researchgate.net/publication/305331245_IRENA_andIEA_PVPS_2016_-_End-of-Life_Management_Solar_Photovoltaic_Panels
- J. Kuitche. (2015). *Statistical lifetime prediction for photovoltaic modules*. Arizona State University, EEUU.
- 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>
- Jung, B., Park, J., Seo, D., & Park, N. (2016). Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(8), 4079–4083. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00894>

- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., & Ryu, H. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, *47*, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>
- Khattak, C. P., Joyce, D. B., & Schmid, F. (2002). A simple process to remove boron from metallurgical grade silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *74*(1–4), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00051-X)
- Kim, Y., & Lee, J. (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *98*, 317–322. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.11.022>
- Klugmann-Radziemska, E., & Ostrowski, P. (2010). Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy*, *35*(8), 1751–1759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.031>
- Klugmann-Radziemska, E., Ostrowski, P., Drabczyk, K., Panek, P., & Szkodo, M. (2010). Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *94*(12), 2275–2282. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.07.025>
- Komoto, K. (2014). Developments on PV Recycling in Japan. *Workshop OnPV Life Cycle Management and Recycling at the 29thEU-PVSEC*. <https://docplayer.net/48750620-Developments-on-pv-recycling-in-japan.html>
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C. E., Jahn, U., Berger, K., Kato, K., Friesen, T., Liu, H., & Van Iseghem, M. (2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules. In *IEA-Photovoltaic Power Systems Programme*. <https://iea-pvps.org/key-topics/review-of-failures-of-photovoltaic-modules-final/>

- Kumar, N. M., Chopra, S. S., de Oliveira, A. K. V., Ahmed, H., Vaezi, S., Madukanya, U. E., & Castañón, J. M. (2020). Solar PV module technologies. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 51–78). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819610-6.00003-x>
- Kumar, S., & Sarkan, B. (2013). Design for reliability with weibull analysis for photovoltaic modules. *Int. J. Curr. Eng. Technol*, 129–134. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-For-Reliability-With-Weibull-Analysis-For-Kumar-Sarkar/beba3b9edb6e2db3488d20b4fc6e1ebb1bdd5429>
- 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>
- Lee, J. K., Lee, J. S., Ahn, Y. S., Kang, G. H., Song, H. E., Kang, M. G., Kim, Y. H., & Cho, C. H. (2018). Simple pretreatment processes for successful reclamation and remanufacturing of crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(3), 179–187. <https://doi.org/10.1002/pip.2963>
- 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>
- Li, Y., & Zhang, L. (2021). Application of Si-Based Solvents to the Purification of Metallurgical Grade-Silicon. In *Separation and Purification Reviews* (Vol. 50, Issue 2, pp. 115–138). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15422119.2019.1623253>

- Lovato, É. S., Donato, L. M., Lopes, P. P., Tanabe, E. H., & Bertuol, D. A. (2021). Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials. *Journal of CO₂ Utilization*, *46*, 101477. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101477>
- Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., & Corkish, R. (2018). A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. In *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74390>
- 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>
- Masoumian, M., & Kopacek, P. (2015). End-of-Life Management of Photovoltaic Modules. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(24), 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.076>
- Mathew, M., Kumar, N. M., & I Koroth, R. P. (2018). Outdoor measurement of mono and poly c-Si PV modules and array characteristics under varying load in hot-humid tropical climate. *Materials Today: Proceedings*, *5*(2), 3456–3464. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.592>
- METI and MOE. (2015). *Report on Reuse, Recycling and Proper Treatment of EOL Renewable Energy Equipment, METI and the MOE, Tokyo*. https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/renewable/index.html
- METI and MOE. (2016). *Guidelines on End-of-Life Management of PV Modules, METI and MOE, Tokyo*. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/102441.pdf>
- Ministry of Environment, Forest, and C. C. (2016). “E-waste (Management) Rules,” *Gazette of India, Part II, Section 3, Sub-section (i)*.

- Ministry of the Environment. (2018). *Ministerio del Medio Ambiente_ “Lineamientos para la Promoción del Reciclaje de Equipos de Generación de Energía Solar (Segunda Edición).”*
<https://www.env.go.jp/press/106294.html>
- Müller, A., Wambach, K., & Alsema, E. (2006). Life cycle analysis of solar module recycling process. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 895(1), 89–94.
<https://doi.org/10.1557/proc-0895-g03-07>
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Altimari, P., Padoan, F. C. S. M., Abo Atia, T., Beolchini, F., Amato, A., & Toro, L. (2019). Solvent versus thermal treatment for glass recovery from end of life photovoltaic panels: Environmental and economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 248, 109313.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109313>
- 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 automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste Management*, 59, 422–431.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.011>
- Park, J., Kim, W., Cho, N., Lee, H., & Park, N. (2016). An eco-friendly method for reclaimed silicon wafers from a photovoltaic module: from separation to cell fabrication. *Green Chemistry*, 18(6), 1706–1714. <https://doi.org/10.1039/C5GC01819F>
- Park, J., & Park, N. (2014). Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. *RSC Advances*, 4(66), 34823–34829.
<https://doi.org/10.1039/C4RA03895A>
- Pham, H. (2006). Springer Handbook of Engineering Statistics. In *Springer Handbook of Engineering Statistics* (Vol. 21, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-288-1>

- Pires, J. C. S., Otubo, J., Braga, A. F. B., & Mei, P. R. (2005). The purification of metallurgical grade silicon by electron beam melting. *Journal of Materials Processing Technology*, *169*(1), 16–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.035>
- PV CYCLE programme reaches important milestone. (2014). PV CYCLE programme reaches important milestone. *Renewable Energy Focus*, *15*(6), 10. [https://doi.org/10.1016/s1755-0084\(14\)70134-6](https://doi.org/10.1016/s1755-0084(14)70134-6)
- Radziemska, E., Ostrowski, P., & Seramak, T. (2009). Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a main stage of PV modules recycling. *Ecological Chemistry and Engineering S*, *16*(3), 379–387. https://www.researchgate.net/publication/294623344_Chemical_treatment_of_crystalline_silicon_solar_cells_as_a_main_stage_of_PV_modules_recycling
- Rakotoniaina, J. P., Suitner, H., Sessa, T., Nisi, A., Attanasio, A., Sabia, G., Tammara, M., Dabala, M., Pezzato, L., Brunelli, K., Cerchier, P., & Audoin, C. (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>
- Ramirez Agudelo, A. (2018). *Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia* [Universidad EIA]. <https://doi.org/10.1/JQUERY.MIN.JS>
- RCRA. (1976). *Resource Conservation and Recovery Act, RCRA, 42 U.S.C. §6901 et seq. 1976*, Environmental Protection Agency, US. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-resource-conservation-and-recovery-act>
- Riech, I., Castro-Montalvo, C., Wittersheim, L., Giacomán-Vallejos, G., González-Sánchez, A., Gamboa-Loira, C., Acosta, M., & Méndez-Gamboa, J. (2021). Experimental Methodology

- for the Separation Materials in the Recycling Process of Silicon Photovoltaic Panels. *Materials*, 14(3), 581. <https://doi.org/10.3390/ma14030581>
- ROSI SAS. (2017). *Photovoltaic modules recycling – ROSI*. <https://www.rosi-solar.com/photovoltaic-modules-recycling/>
- ROTH International. (2018). *Recycling of photovoltaic modules - ROTH International*. <https://www.roth-international.de/en/recycling-recovery/recycling-of-photovoltaic-modules/>
- 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>
- Saga, T. (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. In *NPG Asia Materials* (Vol. 2, Issue 3, pp. 96–102). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.82>
- Samuel J. Ling, Jeff Sanny, W. M. (2012). *Corrientes de Foucault - Física Universitaria Volumen 2* | OpenStax. <https://openstax.org/books/fisica-universitaria-volumen-2/pages/13-5-corrientes-de-foucault>
- Sandoval, V. (2019). *PROYECTO DE EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN DESUSO O FALLA*. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/49708>
- Santamaría, G., & Castejón, A. (2019). Instalaciones solares fotovoltaicas - Germán Santamaría, Agustín Castejón - Google Libros. In *Santamaría G & Castejón A*. <https://books.google.com.sv/books?id=ayq8AwAAQBAJ&printsec=copyright>

Saverio Petrangelo Chiarmo Alessandra Bonoli. (2010). *FACOLTÀ DI INGEGNERIA CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE TESI DI LAUREA In Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie M FOTOVOLTAICO SOSTENIBILE: LA GESTIONE E IL RICICLO DEI MODULI A FINE VITA.*

Senate Bill 5939. (2017). “*Washington States Legislature, Promoting a sustainable, local renewable energy industry through modifying renewable energy system tax incentives and providing guidance for renewable energy system component recycling.*”

Seo, B., Kim, J. Y., & Chung, J. (2021). Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts. *Waste Management*, 128, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.045>

Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar pv modules. In *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* (Vol. 8, Issue 5, pp. 597–610). <https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610>

Shea, J. J. (2005). Clean electricity from photovoltaics [Book Review]. In *IEEE Electrical Insulation Magazine* (Vol. 18, Issue 4). <https://doi.org/10.1109/mei.2002.1019908>

SIEL. (2022). *Ministerio de minas y energía - Proyectos de generación inscritos - UPME.* http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2021/Registro_marzo_2021.pdf

State Council of the People’s Republic of China. (2011). *Waste Electrical and Electronic Products Recycling Regulations, Beijing.* www.gov.cn/flfg/2009-03/04/content_1250844.htm.

Stiftung Elektroaltgeräte. (2015). *Stiftung Elektroaltgeräte Register, Stiftung Elektroaltgeräte.* <https://www.stiftung-ear.de/en/>. <https://www.stiftung-ear.de/en/home>

CIS-LAB Co, L. (2022). *Muflas Alta Temperatura TE-M12D - Productos Cis-Lab.* <https://www.cislab.mx/p/muflas-alta-temperatura-te-m12d/>

- Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Rosa, P. (2015). End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 47, pp. 552–561). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076>
- D'Adamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (2017). Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>
- Daily Wealth, B. (n.d.). *Estructura general de un módulo de silicio cristalino. Special Report: Solar Technology*. Retrieved August 19, 2022, from <https://www.wealthdaily.com/report/solar-technology/1409>
- Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 109, pp. 532–550). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
- European Parliament and The Council of European Union. (2012). DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) (Text with EEA relevance). In *Journal of the European Union: Vol. 197/38*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:en:PDF%0Ahttps://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- 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>

- Huang, W. H., & Tao, M. (2015, December 14). 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>
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., de Oliveira, A. K. V., Ahmed, H., Vaezi, S., Madukanya, U. E., & Castañón, J. M. (2020). Solar PV module technologies. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 51–78). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819610-6.00003-x>
- Kumar, S., & Sarkan, B. (2013). Design for reliability with weibull analysis for photovoltaic modules. *Int. J. Curr. Eng. Technol*, 129–134.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Design-For-Reliability-With-Weibull-Analysis-For-Kumar-Sarkar/beba3b9edb6e2db3488d20b4fc6e1ebb1bdd5429>
- Liu, F. (2022). *Weihai Chem-Equip Machinery Co., Ltd.*
<https://chemequip.en.alibaba.com/minisiteentrance.html?spm=a2700.details.cordpanyb.2.11fd5d28NrdUEl&from=detail&productId=1600262585930>
- Pern, J. (2008). Module Encapsulation Materials, Processing and Testing (Presentation). *APP International PV Reliability Workshop*, 1–33.
<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44666.pdf>
- SIEL. (2022). *Ministerio de minas y energía - Proyectos de generación inscritos - UPME*.
http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2021/Registro_marzo_2021.pdf
- SIMEC, U. (Unidad de P. M. E. (2022). Inscripción de proyectos de Generación. *SIEL - SISTEMA DE INFORMACION ELECTRICO COLOMBIANO*, 1–2.
<http://www.siel.gov.co/Inicio/Generacin/InscripcindeproyectosdeGeneracin/tabid/113/De-fault.aspx>

- Tao, J., & Yu, S. (2015). Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. In *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Vol. 141, pp. 108–124). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.005>
- ThermoFisher. (2021). *Diethyl terephthalate 02-B21401* / *CymitQuimica*. <https://cymitquimica.com/products/02-B21401/636-09-9/diethyl-terephthalate/>
- Woodhouse, M., Smith, B., Ramdas, A., & Robert Margolis. (2019). Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap. *National Renewable Energy Laboratory, February*, 1–46. <https://doi.org/10.2172/1495719>
- 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. (2022a). 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>
- Xu, X., Lai, D., Wang, W., & Wang, Y. (2022b). 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>
- TE-M12D, CIS-LAB Co, L. (2022). *Muflas Alta Temperatura TE-M12D - Productos Cis-Lab*. <https://www.cislab.mx/p/muflas-alta-temperatura-te-m12d/>

- Tickner, J., Rajarao, R., Lovric, B., Ganly, B., & Sahajwalla, V. (2016). Measurement of Gold and Other Metals in Electronic and Automotive Waste Using Gamma Activation Analysis. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 296–303. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0051-y>
- Tokoro, C., Nishi, M., & Tsunazawa, Y. (2021). Selective grinding of glass to remove resin for silicon-based photovoltaic panel recycling. *Advanced Powder Technology*, 32(3), 841–849. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.01.030>
- Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (UPME). (2022). *Inscripción de proyectos de Generación*. Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL). <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generación/InscripcióndeproyectosdeGeneración/tabid/113/Default.aspx?PageContentID=1163>
- Union Europea. (2012). Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) Texto pertinente a efectos del EEE. *Diario Oficial de La Unión Europea*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- UPME. (2015). 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
- UPME. (2022). Registro de Proyectos de Generación Inscripción. *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*, 0520, 1–36. http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2022/Registro_febrero_2022.pdf

- Wambach, K., Heath, G., & Libby, C. (2017). *Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe* (Issue April). <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=460%0Ahttps://iea-pvps.org/key-topics/lci-of-current-european-pv-recycling-wambach-heath-2017-by-task-12/>
- Wang, R., Song, E., Zhang, C., Zhuang, X., Ma, E., Bai, J., Yuan, W., & Wang, J. (2019). Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment. *RSC Advances*, 9(32), 18115–18123. <https://doi.org/10.1039/c9ra03582f>
- Wang, T.-Y. (2016). *Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life*. 287–317. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50521-2_11
- 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>
- Weckend Stephanie, Wade Andreas, H. G. (2016). *IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf* International Energy Agency Photovoltaics. <https://es.scribd.com/document/365062506/IRENA-IEAPVPS-End-of-Life-Solar-PV-Panels-2016-pdf>
- Weihai Chem-Equip Machinery Co., L. (2022). *CF-3000LReactor, Reactor directo de Weihai Chem-Equip Machinery Co., Ltd. en CN*. https://chemequip.en.alibaba.com/productgroup/828264669-2/Reactor.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.41.fee57d949kOvr1&filterSimilar=true&filter=null

- WU YUANYUAN. (2016). *Comparison of different commercial solar photovoltaic modules* (Issue May).
- Xi, F., Li, S., Ma, W., Chen, Z., Wei, K., & Wu, J. (2021). A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon. *Hydrometallurgy*, 201, 105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>
- 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>
- Yasuda, K., Morita, K., & Okabe, T. H. (2014). Processes for production of solar-grade silicon using hydrogen reduction and/or thermal decomposition. In *Energy Technology* (Vol. 2, Issue 2, pp. 141–154). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/ente.201300131>
- Ye, X., Zou, S., Chen, K., Li, J., Huang, J., Cao, F., Wang, X., Zhang, L., Wang, X. F., Shen, M., & Su, X. (2014). 18.45%-Efficient Multi-Crystalline Silicon Solar Cells with Novel Nanoscale Pseudo-Pyramid Texture. *Advanced Functional Materials*, 24(42), 6708–6716. <https://doi.org/10.1002/adfm.201401589>

- Yi, Y. K., Kim, H. S., Tran, T., Hong, S. K., & Kim, M. J. (2014). Recovering valuable metals from recycled photovoltaic modules. *Https://Doi.Org/10.1080/10962247.2014.891540*, 64(7), 797–807. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.891540>
- Yoshikawa, T., & Morita, K. (2012). An evolving method for solar-grade silicon production: Solvent refining. *JOM*, 64(8), 946–951. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0371-8>
- Yuge, N., Abe, M., Hanazawa, K., Baba, H., Nakamura, N., Kato, Y., Sakaguchi, Y., Hiwasa, S., & Aratani, F. (2001). Purification of metallurgical-grade silicon up to solar grade. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(3), 203–209. <https://doi.org/10.1002/pip.372>
- Zhang J, Lv F, et al. (2015). “*Technical route and policy suggestion of PV recycling in China.*”
- Zimmermann, T. (2013). “*Dynamic Material Flow Analysis of Critical Metals Embodied in Thin-film Photovoltaic Cells*”, *Artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit (Sustainability Research Centre)*, *Artec-paper Nr. 194, Bremen*. www.uni-bremen.de/%0Afileadmin/user_upload/single_sites/artec/artec_Dokumente/%0Aartec-paper/194_paper.pdf (viewed June 2015).

Apéndices

Apéndice A. Normativas implementadas en algunos países para el reciclaje

La Unión Europea (UE) es la directiva actual más completa que existe sobre el final de la vida útil de Residuos Eléctricos y Electrónicos, donde se incluyen los módulos fotovoltaicos, se abarcan los lineamientos para la gestión del ciclo de vida y su posterior recolección teniendo en cuenta la responsabilidad del productor EoL. También detallan los enfoques de países como Japón y Estados Unidos en materia normativa para la gestión de residuos fotovoltaicos, mientras países como China e India, mercados fotovoltaicos en auge deberán realizar regulaciones sobre este tema en el mediano plazo.

Normativa en la Unión Europea.

Las directivas de la Unión Europea son las que elaboran las normas y objetivos que se deben seguir para el tratamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en Europa. El marco desarrollado aborda el complejo flujo de residuos, protegiendo el medio ambiente y la salud humana, reduciendo el impacto global que producen los desechos, situando la responsabilidad de la gestión final de la vida útil en los productores que quieren comercializar sus productos en la UE.

La primera normativa desarrollada: la Directiva 2002/96/EC en el año 2003, instaurada por el Consejo y el Parlamento Europeo, la cual empezó a regir a partir de febrero del mismo año, una medida insuficiente dada la cantidad y el flujo de residuos cada vez mayor. Sin embargo, es una de las primeras resoluciones que insistió en preservar, proteger y cuidar la calidad del medio

ambiente (Commission of the European Communities., 2003). En los años siguientes se fue adaptando esta normativa, pero debido al acelerado crecimiento de los residuos, la Comisión Europea consideró modificar sustancialmente la norma, recomendando la refundación de dicha Directiva, la cual fue reemplazada con la Directiva 2012/19/EU en febrero 2012 (Union Europea, 2012).

Esta directiva es la primera en incluir detalles sobre la gestión final de vida útil de los módulos fotovoltaicos, establece la prevención de la generación de RAEE y, además, la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización de dichos residuos, a fin de reducir su eliminación y contribuir al uso eficaz de los recursos y la recuperación de materias primas. Esta directiva entró en vigor en agosto de 2012, y todos los miembros de la UE deben acogerse a ella, en total son 28 Estados miembros que deben ser responsables de la gestión de sus residuos.

A continuación, detallaremos algunas artículos relevantes que detalla la normativa que son fundamentales para su aplicación en los procesos de reciclaje y la gestión de residuos fotovoltaicos (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Recolección de residuos RAEE separada (Artículo 5)

Los países miembros de la UE deben generar estrategias adecuadas que permitan gestionar los residuos RAEE de forma adecuada y sancionar a quienes dispongan de estos residuos en vertederos urbanos (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Eliminación y transporte de los RAEE (Artículo 6)

Se establece que la recogida y el transporte de los RAEE recogidos que han sido previamente separados antes de su recolección, se hará de acuerdo con las condiciones más adecuadas para que se pueda efectuar los procesos de reciclaje, reutilización y confinamiento de

las sustancias tóxicas (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Índice de recogida de los RAEE (Artículo 7)

Este consiste en un principio de responsabilidad del productor, que es supervisado por cada estado miembro, donde se debe establecer anualmente un índice mínimo de recogida. Entre los años 2016 y 2019, este índice será del 45%, a partir del 2019 el índice será del 65%, del promedio anual del peso de los AEE introducidos al mercado en los últimos tres años o el 85% de los RAEE generados en su territorio (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Tratamiento apropiado de los RAEE (Artículo 8)

Todos los estados miembros de la UE deben asegurar que el tratamiento que reciben los diferentes residuos recolectados sea el indicado, incluyendo estrategias de reutilización o de reciclaje que permitan recuperar materiales valiosos. (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Sistemas de financiación para los RAEE (Artículos 12 y 13)

Los países miembros de la UE deben exigir el principio de responsabilidad al productor, este debe financiar la gestión que involucra recolección, transporte y tratamiento para los residuos provenientes de sus productos (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Información para los usuarios (Artículo 14)

Los Estados deben exigir a los productores que se les informe a los compradores sobre los costos asociados a la recogida, tratamiento y gestión de los residuos al final de su vida útil de forma

amigable ambientalmente (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Ramirez Agudelo, 2018; Union Europea, 2012).

Normativa en Alemania

Alemania es un país perteneciente a la Unión Europea que se rige por la directiva 2012/19/EU, a través de una modificación de la ley de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), pero con algunas particularidades para su adopción que enunciamos a continuación.

Los marcos regulatorios dados por esta directiva fueron incorporados a la legislación alemana en octubre de 2015, esta ley fue conocida como “Elektroaltgerätegesetz o ElektroG” que traduce ley de aparatos eléctricos y electrónicos. La ley ElektroG obliga a los productores que comercializan sus productos con usuarios a cumplir las obligaciones establecidas para la gestión final de la vida útil de los módulos fotovoltaicos (ElektroG, 2005).

La regulación para los residuos electrónicos en Alemania está en manos del “Stiftung Elektro-Altgeräte Register o Stiftung EAR “que traduce Registro Nacional de Residuos de Aparatos Eléctricos, este organismo se encarga de registrar a los productores, coordinar los suministros de contenedores, la recogida en los puntos de recolección (Stiftung Elektroaltgeräte, 2015).

Normativa en Reino Unido

Reino Unido es un país perteneciente a la Unión Europea, es un mercado bastante joven en el mundo de la energía fotovoltaica, sin embargo, ha tenido un gran crecimiento en los últimos años. Hasta enero del año 2014, Reino Unido adoptó la directiva RAEE para la gestión de residuos fotovoltaicos, anteriormente estaba cubierto por iniciativas voluntarias de los productores, como PV CYCLE. El gobierno de Reino Unido creó una nueva categoría para financiar la recogida y reciclaje de módulos fotovoltaicos. Esto disminuye el costo que pagan los productores por la

recogida de sus productos. Esta categoría le da más control a la industria sobre la gestión y el reciclaje de los módulos (IRENA AndIEA PVPS, 2016).

Normativa en Japón

Japón a diferencia de la UE no dispone de un marco normativo para la gestión de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil, en cambio estos son tratados de acuerdo con la normativa general para gestión de residuos conocida como: “La Ley de Gestión de Residuos y Limpieza de residuos y limpieza pública” desarrollada por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) y el Ministerio de Medio Ambiente (MOET) (METI and MOE, 2015). Esta ley incorpora a los participantes y sus responsabilidades en la gestión de los residuos, involucrando productores, gestores y el proceso de eliminación en vertederos (IRENA AndIEA PVPS, 2016; METI and MOE, 2015).

En abril del año 2016, se crearon unas directrices para una adecuada gestión de residuos, donde se incluía la legislación para el desmantelamiento, el transporte, la reutilización, el reciclaje y la eliminación de desechos fotovoltaicos (METI and MOE, 2016).

Normativa en EE. UU

Al igual que en el caso de Japón, en Estados Unidos no existe un marco normativo específico sobre desechos de módulos solares, no se obliga a recoger ni a reciclar. Tradicionalmente los residuos han sido tratados según un marco legal para residuos sólidos peligrosos mediante la “Ley de conservación y recuperación de recursos” (RCRA, 1976).

Es importante resaltar que California y Washington han empezado a desarrollar su propio marco normativo para el reciclaje de módulos fotovoltaicos. California es uno de los Estados que está en proceso de desarrollo de una normativa interna para la gestión de sus residuos. En sesión legislativa entre los años 2014 y 2015, se presentó un proyecto de ley conocido como “ley de

senado 489” que cambia la clasificación de los módulos solares de residuos peligrosos a residuos universales, esta norma entrara en vigor después de un año de realizada la reunión (IRENA AndIEA PVPS, 2016; Sharma et al., 2019).

Washington es otro Estado que ha trabajado por el desarrollo de un marco regulatorio para el reciclaje, en 2017, aprobó el proyecto “ley de Senado 5939” que modifica los incentivos fiscales a nivel estatal para uso de energías limpias y los programas para la recolección y reciclaje de paneles solares al final de su vida útil (Senate Bill 5939, 2017).

Normativa en China

En la actualidad China no cuenta con unas especificaciones para el reciclaje o tratamiento de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil. Se rige mediante un reglamento publicado en 2011 para la gestión de los residuos electrónicos que se conoce como: “Reglamento de Gestión del Reciclaje de Productos Eléctricos y Electrónicos” (State Council of the People’s Republic of China, 2011).

El reglamento no obliga a los productores a recoger y reciclar los desechos de sus productos por sí mismos, si no desean hacerlo pueden en cambio contratar a terceros como agencias que estén calificadas para el reciclaje o eliminación en instalaciones adecuadas. Cabe resaltar que actualmente los paneles solares no entran en la categoría para el tratamiento de los residuos eléctricos y electrónicos de la normativa (IRENA AndIEA PVPS, 2016). Esto se debe principalmente a los bajos volúmenes de residuos, sin embargo, cuenta con el Programa Nacional de I+D de Alta Tecnología para el reciclaje y la eliminación de residuos, el cuál proporciona recomendaciones para desarrollar las políticas que aborden los retos para la gestión de los residuos fotovoltaicos (Zhang J, Lv F, 2015).

Normativa en India

Este país actualmente no cuenta con un marco legal que obligue a la gestión, recolección o reciclaje de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil. La normativa actual que rige para la recolección de desechos es una normativa general sobre el tratamiento de los residuos que se conoce como: “Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos de 2016”. Este reglamento gestiona las normas sobre la recolección de residuos peligrosos, abarca los requisitos para residuos electrónicos en general, pero no se especifica a los módulos fotovoltaicos (Ministry of Environment, Forest, 2016).

Apéndice B. Datos de proyección paneles fotovoltaicos en desuso

Escenario de pérdidas regulares y pérdidas tempranas

Tabla 13

Estimación de la probabilidad de pérdidas para los dos escenarios según la distribución de Weibull

Años de vida	Probabilidad pérdidas ($\alpha=5.3769$)	Probabilidad pérdidas ($\alpha=2.4928$)
1	0	0
2	6,22E-05	1,12846173
3	0,00335058	20,2700172
4	0,05678813	133,397758
5	0,47793794	510,604442
6	2,55859943	1.478,77185
7	10,1843505	3.584,85852
8	33,0632809	7.484,99797
9	92,0363645	14.011,2257
10	226,923933	23.988,2775
11	507,098015	37.991,1242
12	1.044,11205	56.463,1851
13	2.005,69141	79.754,9197
14	3.630,68158	108.136,731
15	6.244,56761	141.804,384
16	10.275,079	180.881,395
17	16.267,2118	225.420,187
18	24.896,7388	275.402,909
19	36.980,9331	330.742,43
20	53.484,8136	391.283,844