



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Medioambiente  
Ingeniería Ambiental

**PLAN DE MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ASOCIADOS A LOS PANELES  
SOLARES EN DESUSO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: ISABEL GALA MORÁN SOTO**

**PROFESOR GUÍA: JAIRO VALENCIA MUÑOZ**

---

**Valparaíso, 2022**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi pequeña y buena familia por confiar en mi desde el inicio de este proceso académico, me han dado la fuerza para seguir adelante pese a cualquier adversidad que se presentó en este camino. Doy las gracias por esforzarse para entregarme todo lo que necesite durante mi vida, sobre todo amor.

Quiero agradecer especialmente a mi ángel de la guarda que estuvo ahí en cada decisión, sé que en algún lugar estas feliz de esto que está pasando, solo quiero decir que lo lograré.

Le doy las gracias a mi pareja por estar a mi lado en cada momento, apoyándome y alentándome para lograr todo lo que hemos soñado, gracias por el amor y lealtad incondicional. Una mención honrosa a nuestro hijo Martín que llegó en el último momento para demostrarnos que no hay límites para cumplir lo que uno se propone en la vida.

Agradezco la confianza y conocimiento otorgado por mi profesor guía Jairo Valencia que me ayudó a terminar este trabajo de la mejor manera. También, incluyo los agradecimientos correspondientes a los profesores de la carrera, que me han entregado las herramientas necesarias para cumplir mi meta de ser profesional.

Estoy muy agradecida del apoyo de mis amigos de la universidad, gracias por considerarme en cada momento, ya sea en lo académico como en lo extracurricular.

En fin, a todos los que están o estuvieron en algún momento de mi vida durante el proceso académico, les doy las gracias.

## RESUMEN

El alcance de este trabajo va desde el fin de la vida útil de los paneles solares hasta conocer la disposición final de los elementos que no son reciclables en el mercado nacional.

El primer objetivo de este trabajo fue recopilar información acerca del proceso de gestión de los paneles solares en desuso derivados de los proyectos fotovoltaicos obteniendo como resultado que la mayoría de los proyectos delega la gestión de los módulos fotovoltaicos en desuso a los fabricantes, que, en su mayoría tiene un convenio con la asociación PV-CYCLE para realizar el reciclaje, en caso contrario, disponen el módulo en rellenos sanitarios u otro lugar que este autorizado por el SEREMI de Salud.

Se identificaron los componentes de un módulo fotovoltaico, permitiendo reconocer que el vidrio, el aluminio y otros metales son valorizables en el mercado nacional, puesto que, existen empresas inscritas para realizar el reciclaje de estos elementos.

Sin embargo, al comparar las distintas formas de reciclaje, se obtuvo como resultado de la investigación que ningún tratamiento separa completamente el vidrio de los otros componentes del panel solar, pudiendo rescatar como residuo sólido valorizable, el marco de aluminio y la caja de conexiones. Concluyendo que el mejor método a utilizar para el reciclaje es el mecánico, obteniendo mejor puntuación en comparación con los métodos térmicos y químicos.

Se elaboró un plan de manejo para los residuos sólidos que cuenta con dos pasos a seguir, en primera instancia realizar una evaluación inicial del proyecto fotovoltaico, permitiendo definir las falencias que pueda tener en su gestión para los residuos sólidos derivados de los paneles solares en desuso. Luego, el segundo paso consta de acciones y/o actividades correctivas para los criterios de almacenaje, transporte, registro, gestión y empresa, los cuales fueron definidos en la instancia de evaluación.

Se propone un plan de manejo de los residuos sólidos de los paneles solares en desuso que implementa el desmantelamiento de este aparato dentro de la misma instalación de un proyecto fotovoltaico, de esta manera, reciclar al menos el 15% del total del peso del panel solar.

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1	Energías renovables .....	5
1.2	Situación nacional de las energías renovables.....	6
1.3	Energía solar .....	6
1.4	Plantas fotovoltaicas .....	7
1.5	Paneles fotovoltaicos .....	9
1.6	Fallas de los paneles solares.....	11
1.7	Reutilización y Reciclaje de los paneles solares .....	12
1.8	Normativa ambiental aplicable a módulos FV en Chile .....	14
2	PROBLEMA .....	16
3	OBJETIVOS .....	17
3.1	Objetivo general.....	17
3.2	Objetivo específico.....	17
4	METODOLOGÍA.....	18
	Etapa I: Población de estudio.....	18
	Etapa II: Recolección de datos .....	19
	Etapa III: Identificación de los componentes de un módulo fotovoltaico .....	20
	Etapa IV: Alcance del mercado nacional de acuerdo con los componentes del módulo fotovoltaico .....	20
	Etapa V: Comparación de los métodos de reciclaje.....	21
	Etapa VI: Elaboración de un plan de manejo para los residuos sólidos.....	24
5	RESULTADOS .....	29
5.1	Objetivo específico 1: Recopilar información acerca del proceso de gestión de los paneles solares en desuso en los proyectos fotovoltaicos.....	29
5.2	Objetivo específico 2: Determinar los componentes de un módulo fotovoltaico que son valorizables en el mercado nacional. ....	32
5.3	Objetivo específico 3: Comparar distintas formas de reciclaje para los paneles fotovoltaicos. ....	39
5.4	Objetivo específico 4: Elaborar un plan de manejo para los residuos sólidos. ....	44
6	DISCUSIÓN.....	50
7	CONCLUSIÓN .....	52
8	BIBLIOGRAFÍA .....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Alternativas de fin de vida útil de Módulos Fotovoltaicos. Fuente: In-Data-Rigk, 2020..	12
<b>Tabla 4.1:</b> Criterios de evaluación del nivel de información del método de reciclaje de un panel solar en desuso. Elaboración propia.....	21
<b>Tabla 4.2:</b> Criterios de evaluación del nivel de complejidad del método de reciclaje de un panel solar en desuso. Elaboración propia.....	22
<b>Tabla 4.3:</b> Criterios de evaluación de otro proceso para el método de reciclaje de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	22
<b>Tabla 4.4:</b> Criterios de evaluación de probabilidad de causar daño a los componentes del panel solar. Elaboración propia.....	23
<b>Tabla 4.5:</b> Criterios de evaluación del tiempo del método de reciclaje de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	23
<b>Tabla 4.6:</b> Criterios de evaluación del almacenamiento de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	25
<b>Tabla 4.7:</b> Criterios de evaluación del transporte de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	25
<b>Tabla 4.8:</b> Criterios de evaluación del registro de los paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	26
<b>Tabla 4.9:</b> Criterios de evaluación de la gestión de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	26
<b>Tabla 4.10:</b> Criterios de evaluación de la empresa encargada de gestionar los paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	27
<b>Tabla 4.11:</b> Criterios de evaluación del método de reciclaje de paneles solares en desuso. Elaboración propia.....	28
<b>Tabla 4.12:</b> Cálculo de la ponderación total del caso cero. Elaboración propia.....	28
<b>Tabla 4.13:</b> Rangos para determinar la calificación de la evaluación. Elaboración propia.....	28
<b>Tabla 5.1:</b> Características de un panel solar fotovoltaico de celdas monocristalinas. Fuente: Jinko Solar, 2022.....	32
<b>Tabla 5.2:</b> Material recuperado. Fuente: Herrarte, 2020.....	35
<b>Tabla 5.3:</b> Escenario de reciclaje para los distintos componentes de un panel fotovoltaico. Elaboración propia.....	35
<b>Tabla 5.4:</b> Valorización de los componentes y empresas para su gestión. Elaboración propia.....	36
<b>Tabla 5.5:</b> Evaluación de los criterios para los distintos métodos de reciclaje. Elaboración propia.....	42
<b>Tabla 5.6:</b> Cálculo de la ponderación total del caso hipotético. Elaboración propia.....	44
<b>Tabla 5.7:</b> Falencias halladas en el proyecto fotovoltaico hipotético. Elaboración propia.....	44
<b>Tabla 5.8:</b> Competencias y responsabilidades de los distintos actores del plan de manejo de residuos sólidos. Elaboración propia.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Esquema básico del funcionamiento de una central solar. Fuente: PD Sostenible.....	8
<b>Figura 1.2:</b> Esquema de un panel solar. (Clean Energy Reviws, 2019). .....	10
<b>Figura 4.1:</b> Criterios de búsqueda de proyectos fotovoltaicos en la plataforma del SEIA. Fuente: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.....	18
<b>Figura 5.1:</b> Proyección de paneles solares en desuso. Elaboración propia. ....	29
<b>Figura 5.2:</b> Plan de reciclaje fotovoltaico de la planta de tratamiento. Fuente: Empresa Solarix....	37
<b>Figura 5.3:</b> Jerarquía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS). Fuente: Empresa Degraf. ....	38
<b>Figura 5.4:</b> Diagrama para el reciclaje mecánico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia. ....	40
<b>Figura 5.5:</b> Diagrama para el reciclaje térmico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia. ....	41
<b>Figura 5.6:</b> Diagrama para el reciclaje químico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia. ....	41
<b>Figura 5.7:</b> Proceso general de los métodos de reciclaje. Elaboración propia. ....	42
<b>Figura 5.8:</b> Proposición de señales de prohibición y seguridad. Fuente: Google Imágenes.....	45
<b>Figura 5.9:</b> Colores de contenedores para distintos residuos. Fuente: Ecocontenedores, 2022. ....	46
<b>Figura 5.10:</b> Esquema resumen de los pasos a seguir para el plan de manejo de los residuos sólidos derivados de paneles solares en desuso. Elaboración propia. ....	49

## LISTADO DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

- AEE: Aparatos Eléctricos y Electrónicos
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono
- DIA: Declaración de Impacto Ambiental
- DS: Decreto Supremo
- EPP: Elementos de Protección Personal
- ERNC: Energías Renovables No Convencionales
- EVA: Etilvinilacetato
- FV: fotovoltaico
- GIRS: Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- HDPE: Polietileno de alta densidad
- INE: Instituto Nacional de Estadística
- IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Estandarización)
- mm: milímetros
- MW: Millón de Vatios
- NCh: Norma Chilena
- ONU: Organización de las Naciones Unidas
- RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
- RCA: Resolución de Calificación Ambiental
- RESPEL: Residuos Peligrosos
- SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
- PVB: Polivinilobutiral
- PVC: Policloruro de Vinilo
- PVF: Fluoruro de Polivinilo
- Wp: Vatios pico

# 1 INTRODUCCIÓN

La transformación demográfica a nivel mundial influyó en la estructura social, debido a una redistribución territorial, marcado por un acelerado proceso de urbanización, lo que conllevó a un incremento en la población en comparación al siglo XIX. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se espera que aumente la cantidad de personas en los próximos años, pasando de los 7.700 millones en el año 2019 a los 9.700 millones en 2050. Las proyecciones de población proporcionan una referencia del comportamiento de las tasas de natalidad, mortalidad y migración, sin embargo, estas son particulares para cada país.

Chile, sigue la tendencia del incremento en el tamaño de la población, y, se proyecta que hacia el año 2050 aumentará en aproximadamente 2,8 millones la población, el supuesto del incremento es que ocurrirán más nacimientos que muertes y que la inmigración excede la emigración (INE, 2018).

El desarrollo de la sociedad se basa en la utilización de energía para realizar las actividades cotidianas, luego de la revolución industrial la tendencia mundial es requerir más cantidad de energía por persona a medida que pasa el tiempo. El aumento de la población en conjunto con el continuo gasto energético por persona desembocó la situación actual, caracterizada por la inquietud de los gobiernos para suplir la demanda energética que se requiere actualmente, por lo que cada vez se instauran políticas públicas que colaboren a solucionar esta necesidad de manera eficiente y con el objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por lo tanto, en el último tiempo la generación de energía ha ido cambiando por el aumento de variedad en tecnologías que permiten administrar potencia al sistema eléctrico, de manera sostenible con el medio ambiente.

Sin embargo, las obras físicas de las tecnologías que se instauran en el mercado energético nacional son artefactos electrónicos nuevos que no cuentan con alternativas claras para revalorizar sus componentes al final de su vida útil. Como es el caso de los paneles solares fotovoltaicos, que cada vez son más los instalados en el territorio nacional por ser considerada una energía renovable con bajo costo de implementación.

A continuación, se presentarán una serie de conceptos que darán contexto al tema de investigación de este trabajo que considera minimizar el agotamiento de los recursos naturales y reducir al

máximo la generación de residuos, correspondiente a una de las áreas de intervención de la Escuela de Ingeniería en Medioambiente dentro de la temática de Ingeniería Verde.

## 1.1 ENERGÍAS RENOVABLES

La energía renovable o también denominada energía limpia se caracteriza por provenir de fuentes consideradas inagotables, en donde el proceso se puede aprovechar a una escala de tiempo más amplia que la humana, porque la fuente contiene una inmensa cantidad de energía o es capaz de regenerarse en el tiempo de manera natural. Entre estas fuentes de energía se consideran la geotérmica, la biomasa, los biocombustibles, la energía marina o de movimiento de las aguas oceánicas, la energía hidráulica, energía eólica y energía solar.

Los medios de generación renovables no convencionales serán los que presenten las características promulgadas en el artículo 225 letra aa) de la Ley N° 20.257/2008 que “Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales”, las cuales se mencionan a continuación:

- 1) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa, correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios.
- 2) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20.000 kilowatts.
- 3) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía geotérmica, entendiéndose por tal la que se obtiene del calor natural del interior de la tierra.
- 4) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía solar, obtenida de la radiación solar.
- 5) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía eólica, correspondiente a la energía cinética del viento.
- 6) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.

- 7) Otros medios de generación determinados fundadamente por la Comisión, que utilicen energías renovables para la generación de electricidad, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos que establezca el reglamento.

Las energías renovables pasan a clasificarse en convencionales cuando aumenta el grado de desarrollo de la tecnología por ende su aprovechamiento predomina en el mercado energético.

## 1.2 SITUACIÓN NACIONAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Según la Política Energética de Chile del Ministerio de Energía, Energía 2050 [2], plantea que para aquel año al menos un 70% de la matriz energética del país este constituida por Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Lo anterior se complementa con la vigencia en el año 2008 de la Ley N°20.257, que establece la obligación para las empresas eléctricas que efectúan ventas a clientes finales de proveer un porcentaje de la energía comercializada a través de proyectos ERNC, generando un cambio en el mercado eléctrico nacional; en el año 2013 se aumenta el porcentaje de la meta al año 2024 del 10% a un 18% con la Ley N°20.698.

Los compromisos políticos para instaurar el uso de las fuentes renovables para la generación de energía, incluyendo además la disponibilidad de estos recursos a nivel nacional, hace que Chile se destaque como el mejor país para invertir en energías renovables en América según el reporte Climatescope 2021.

De acuerdo con el boletín del Mercado Eléctrico de Generadoras de Chile a marzo de 2022 se cuenta con una capacidad instalada de 31.706 MW. El 57,4% de la capacidad instalada corresponde a fuentes renovables (23,3% hidráulica; 20,0% solar; 12,0% eólico; 1,9% biomasa; y 0,2% geotérmica). Las tecnologías que más se han implementado en el último tiempo son la solar fotovoltaicas y eólica.

## 1.3 ENERGÍA SOLAR

Los flujos que la Tierra recibe de las denominadas energías renovables derivan, en su mayor parte, de la energía radiante proveniente del Sol. El calor y luz solar son la causa de los vientos, de la

evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes y, por consiguiente, de los saltos de agua, entre otras manifestaciones en la naturaleza.

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra de manera directa incide en los objetos, los cuales son iluminados por el Sol, de manera que, puede ser aprovechada para generar energía, ya sea eléctrica o térmica. Para el presente caso la energía solar es transformada en energía eléctrica, a través de células fotovoltaicas que componen un panel solar.

Un importante aspecto de la energía solar es que no aumenta los niveles de dióxido de carbono presentes en la Tierra, ni de otros gases involucrados en el efecto invernadero, es debido a esto que se considera sostenible para abastecer la energía necesaria.

Este tipo de tecnología se clasifica actualmente en el país como una energía renovable no convencional, pero se ha ido generado un interés marcado por parte de distintos actores privados que desean participar del negocio de la instalación de centrales de generación fotovoltaica.

En relación con los proyectos de energía solar fotovoltaica que contribuyen al sistema eléctrico en Chile, se puede mencionar que de los 29.449 [MW] de capacidad instalada un 17,27% corresponde a la generación de energía mediante plantas fotovoltaicas.

#### 1.4 PLANTAS FOTOVOLTAICAS

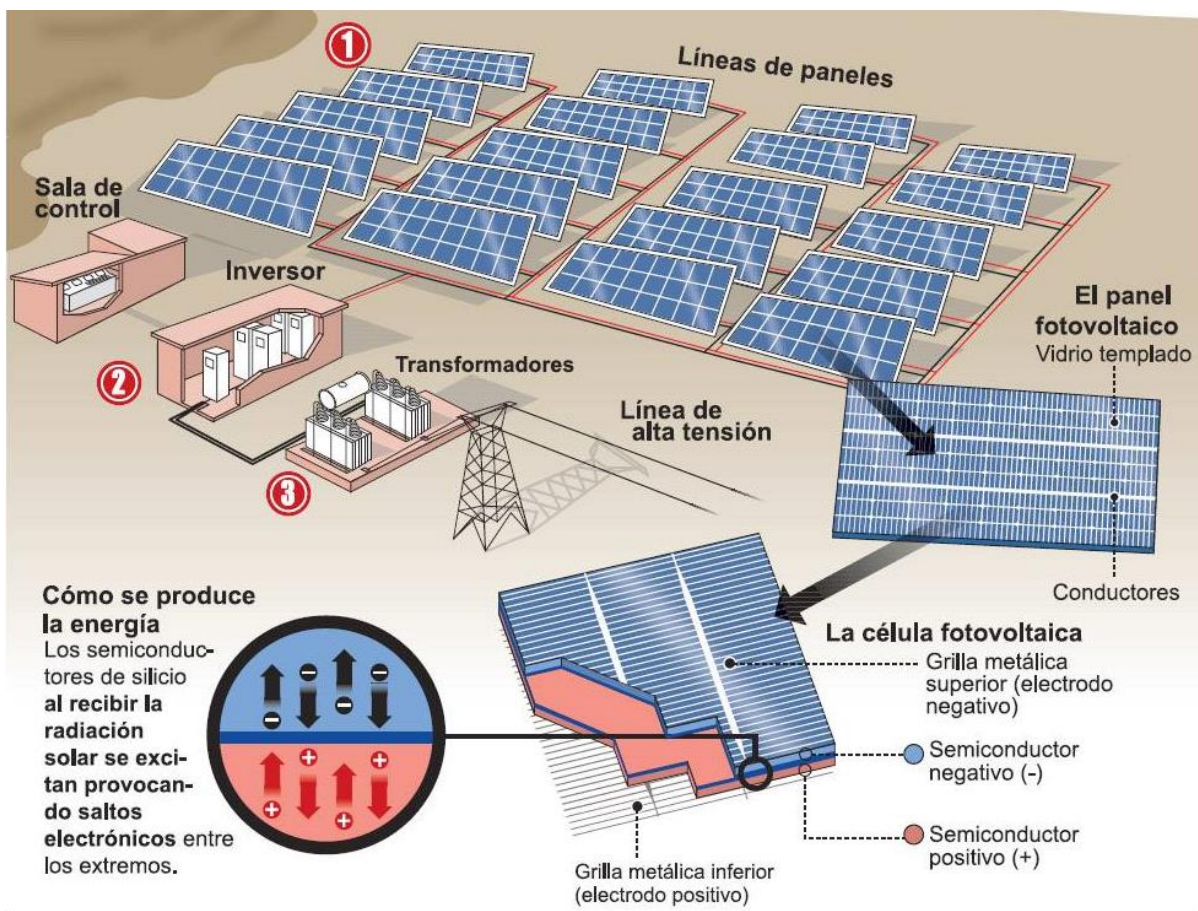
Una planta fotovoltaica convierte energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, el cual se produce en tres etapas:

- 1) *Conversión a corriente continua*: Las placas fotovoltaicas están conformadas por células fotovoltaicas, estas tienen por función captar la radiación y transformarla en energía eléctrica, este proceso se ve favorecido por el uso de silicio, el que es un semiconductor que colabora en el efecto fotovoltaico. La generación de la energía depende de condiciones meteorológicas, entre ellas radiación, humedad y temperatura, es por esto por lo que siempre se necesita de una torre meteorológica en la planta para tener conocimiento de estas variables.
- 2) *Conversión de corriente continua a corriente alterna*: si bien las placas producen corriente continua, en la red la energía eléctrica se trabaja con corriente alterna, para esto la corriente

continua se lleva hasta una cabina de corriente continua, aquí se transforma en corriente alterna por un inversor de corriente, luego se traslada a una cabina de corriente alterna.

- 3) *Transporte de la electricidad:* La energía de la cabina de corriente alterna, aún no está totalmente transformada a energía eléctrica utilizable en la red eléctrica, por tanto, se utiliza un centro de transformación donde se ajusta la intensidad y tensión de las líneas de transporte para finalmente ser suministrados a la red eléctrica.

En la *Figura 1.1* se muestran las instalaciones mediante un esquema básico del funcionamiento de una planta fotovoltaica.



*Figura 1.1:* Esquema básico del funcionamiento de una central solar. Fuente: PD Sostenible.

## 1.5 PANELES FOTOVOLTAICOS

Un módulo fotovoltaico es un equipo estático al cual se le estima una vida útil esta entre los 25-30 años [4], realiza la conversión de la radiación solar en electricidad a través de materiales semiconductores que componen el panel solar, que, en la mayoría de los casos se conforman por celdas de silicio. Su sistema se basa en dos componentes para su funcionamiento, los paneles solares y un inversor, el panel tiene por función transformar la radiación solar y el inversor es el encargado de convertir la corriente continua en corriente alterna, este efecto ocurre cuando los fotones de luz impactan sobre el material, para lograr desplazar un electrón, generando una corriente continua.

El silicio de grado electrónico es el semiconductor utilizado para la fabricación de celdas solares, el cual cuenta con una valencia de tres electrones ( $\text{Si}^{+3}$ ). Previamente este material debe ser tratado químicamente, en dos regiones denominadas P y N, donde el semiconductor de tipo P se sustituye el silicio por átomos de fósforo y para el tipo N se cambia por boro. Para crear el campo eléctrico se utilizan los electrones que quedan libres en P, los cuales ocupan los espacios que tiene el material N, y viceversa.

Sierra et al. (2020) concluyen que los paneles solares de silicio se conforman mediante capas de diferentes materiales, comúnmente vidrio (76%), polímero (10%), aluminio (8%), silicio (5%), cobre (1%), plata (1%), plomo (<1%) y estaño (<1%). Las capas tienen distintos propósitos y se ensamblan con el siguiente orden: marco de aluminio, vidrio protector, el encapsulante, celda solar e interconexiones metálicas, cubierta posterior y cubierta final. La unión P-N de los materiales semiconductores que se ubican en la capa de la celda solar varía en textura con forma piramidal o aleatorias dependiendo de si es monocristalina o policristalina respectivamente.

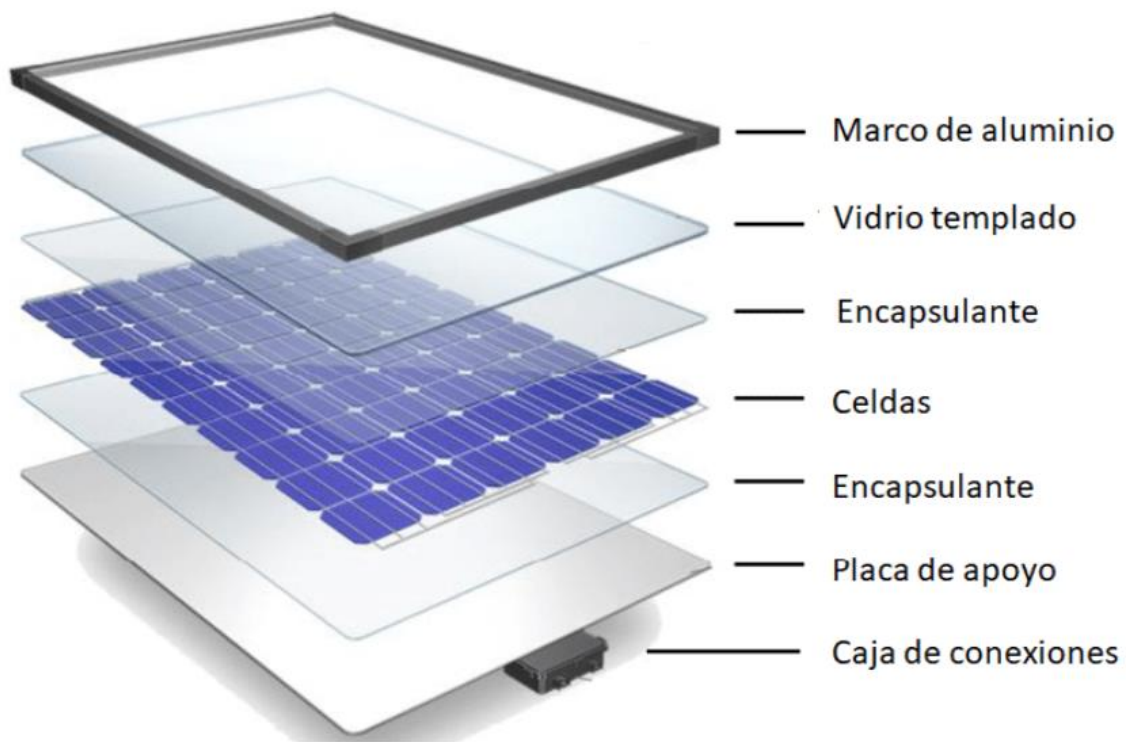


Figura 1.2: Esquema de un panel solar. (Clean Energy Reviews, 2019).

Los paneles cada vez aumentan su eficiencia cambiando el tipo de tecnología empleada, en este proceso se investigan, crean y desarrollan distintos tipos de celdas solares para obtener energía.

Los modelos de paneles solares más comunes son:

- *Panel monocristalino:* Las características físicas de este tipo de células o celdas ordenadas de color azul homogéneo de silicio puro libre de impurezas, con conexiones visiblemente uniformes que lo hace buen conductor. Su rendimiento real va desde los 15-18% de eficiencia. El costo es más elevado en comparación con otro tipo de tecnología, sin embargo, su aprovechamiento de energía es mayor alcanzando el 22% de efectividad.
- *Panel policristalino:* En este tipo de panel se presentan una celda rectangular color entre verde y azul, organizada en una microestructura semi-ordenada. En cuanto al aprovechamiento de la energía el proceso tiene una eficiencia desde el 14% hasta el 16%. El silicio utilizado para su fabricación es impuro pues es dopado con boro, pero con menos

fases de cristalización. En comparación con la celda solar cristalina de silicio monocristalina el costo es aproximadamente 6% más económico. La tecnología de la celda de silicio policristalina son las más usadas actualmente en el mercado global.

Los valores por unidad de los paneles solares van desde los \$112.990 [15], depende de la capacidad de generación, modelo y tipo de distribuidor.

## 1.6 FALLAS DE LOS PANELES SOLARES

Como plantea Sandoval (2019), las fallas pueden darse de forma temprana o pueden ser una falla regular. Una de las fallas regulares son el desgaste con el tiempo, donde sus materiales pierden la capacidad de generación, traduciéndose en una disminución de la potencia máxima. Cuando el panel fotovoltaico es retirado antes de cumplir con su vida útil, es considerada una falla temprana, ya sea por errores humanos o ambientales.

Según la literatura las fallas más comunes son:

- *Falla humana*: Durante la manipulación en la instalación, y la operación es posible producir roturas en los paneles, esto termina con la vida del panel. En la actualidad es la razón principal de término de vida de los paneles en Chile [13].
- *Puntos calientes*: Solo un área del panel solar es afectada por una temperatura elevada. El resultado es una disminución localizada de la eficiencia, que se traduce en una menor potencia de salida [12]. Este efecto se puede generar cuando se impide el paso de la corriente por una o más celdas, al conectarse en serie y al impedir que una de las celdas entregue la corriente el exceso de energía se traduce en calor en esa zona [7].
- *Delaminación*: Es un proceso mediante el cual ocurre la separación entre el vidrio y la célula, por desgaste del encapsulante [10]. Principalmente se debe a un error en la fabricación y la falla es evidente con el paso del tiempo producto del desgaste y condiciones ambientales que propagan la delaminación de sus componentes.
- *Decoloración del encapsulante*: Debido a la constante irradiación que recibe el material del encapsulante este cambia de color, de blanco a amarillo y, a veces, de amarillo a marrón.

Provoca una disminución en la potencia generada y baja su eficiencia por el cambio en la transmitancia de la luz que llega a las células solares [12].

- *Crack*: Consiste en pequeñas grietas en las celdas que generalmente no son visibles a simple vista, y que pueden afectar ambos lados de la celda produciendo una pérdida en la consistencia celular [10].

Para una planta fotovoltaica es crucial cuantificar y predecir los tipos de fallas que pueden terminar produciendo que el panel solar se degrade, puesto que es el equipo más importante para la generación de energía. Dado que es inminente el fin de la vida útil de los paneles solares, ya sea, por fallas regulares o tempranas, se debe encontrar una manera de reutilizar o reciclar componentes.

De acuerdo con las distintas causas que pueden terminar con la vida útil de los módulos fotovoltaico, existen posibles alternativas para el manejo de estos residuos como se puede ver en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1:** Alternativas de fin de vida útil de Módulos Fotovoltaicos. Fuente: In-Data-Rigk, 2020.

Estado del módulo	Vía de tratamiento
El módulo deja de funcionar debido a fallas menores reparables	Acondicionamiento a través de reparación o cambio de partes del módulo para su reutilización
El módulo ha llegado al fin de su garantía o vida útil predeterminado por el productor (sin dejar de funcionar)	El módulo sigue en su lugar instalado sin cambios
	El módulo se desinstala para su reutilización en un mercado secundario
El módulo ha bajado en eficiencia (degradado) de forma leve y todavía cuenta con una eficiencia útil	Desinstalación y reciclaje
El módulo deja de funcionar por fallas mayores que no son reparables	Desinstalación y reciclaje

## 1.7 REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE LOS PANELES SOLARES

La reutilización es un proceso que consta de una reparación o reacondicionamiento del producto, dándole una segunda oportunidad para que sea funcional; este mecanismo de recuperación de ser sobrellevado con éxito reduce en su gran mayoría los desechos y es económicamente rentable.

Bajo el marco de la economía circular, alargar la vida útil permite (Carlos Montalvo, 2016):

- Aprovechar mejor la energía primaria usada para producir el producto (medible por distintos indicadores como, por ejemplo, la huella de carbono)

- Ahorrar energía para el cambio/valorización del producto que significa un anticipado fin de vida útil (igualmente medible por indicadores como la huella de carbono)
- Resguardar recursos naturales en un “status quo” para esperar nueva tecnología para una recuperación eficiente en un futuro (calculable como inversión en recursos naturales)

En caso de no contar con la posibilidad de reparar el aparato, otra opción es el reciclaje, que tiene como objetivo disminuir los desechos transformando los elementos del producto en materia prima o en un nuevo producto, ahorrando energía y costos asociados a la extracción. Las etapas del reciclaje son: generación de residuos, recolección, clasificación y la valorización.

En caso de que sea reciclado un panel solar fotovoltaico, existen distintos métodos para separar los componentes, entre ellos encontramos el método mecánico, el método térmico y el método químico.

- Método Mecánico: se tritura la celda solar hasta conseguir trozos pequeños. Luego, los gránulos pequeños pasan por una serie de procesos: Se separan los componentes mediante diferentes procesos, térmico para sublimar el Etilvinilacetato (EVA) del encapsulante, eléctricos para recuperar metales, flotabilidad, ópticos, entre otros. Es un método sencillo pues está estudiado e industrializado, pero se consiguen componentes de baja pureza, los cuales no pueden ser utilizados en un proceso de economía circular y de menor valor comercial y productivo [7].
- Método Térmico: mediante sólo procesos térmicos se separa la unión semiconductor-EVA, aquello se lleva a cabo encontrando su punto de sublimación que permita realizar un corte con cuchillo o con un láser. Este método permite recuperar componentes de mayor grado de pureza y calidad, permitiendo que tengan un mayor valor comercial y productivo, pero el proceso es más engorroso y existe la posibilidad de dañar componentes durante su aplicación [7].
- Método Químico: también se busca eliminar el EVA pero mediante distintos tipos de disolventes. El proceso se destaca por obtener componentes de alta pureza y calidad.

## 1.8 NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE A MÓDULOS FV EN CHILE

Con el objetivo de disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, se instaura en el año 2016 la Ley N°20.920 “Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje” o ley REP, que, mediante un sistema integrado de gestión se da cumplimiento a las obligaciones establecidas en el marco de dicha ley.

Para esto, se determinan distintas categorías, una de ellas denominada productos prioritarios, que se conforma por:

- Aceites lubricantes
- Aparatos eléctricos y electrónicos
- Baterías
- Envases y embalajes
- Neumáticos
- Pilas

Las cuales tienen como característica ser una sustancia o un objeto que una vez transformado en residuo, o bien, por su volumen, peligrosidad o presencia de recursos aprovechables, queda sujeto a las obligaciones de la responsabilidad extendida del productor, en conformidad a esta ley.

La subcategoría “Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE)” que integra a los paneles fotovoltaicos grandes con una dimensión exterior superior a 50 cm. Según respectiva guía informativa para Chile 2019 los elementos considerados de los residuos de los AEE contienen una amplia variedad de metales valiosos y reutilizables, tales como: Platino (Pt), Paladio (Pd), Aluminio (Al), Cobre (Cu), Plata (Ag), Hierro (Fe), Oro (Au).

Los AEE contienen una amplia variedad de elementos que tienen gestores (empresas de recolección, empresas de reciclaje, municipios y recicladores base), que deben inscribirse como tal en un registro establecido para ser una empresa o persona natural que valore los elementos de un panel solar en desuso. Pero, finalmente quien fabrica e importa el producto es quien se debe hacer cargo del financiamiento de la gestión adecuada de los residuos, ya sean provenientes de residuos de

productos comercializados en el país o sean importados. Sin embargo, no existe una regulación en la gestión de los AEE mediante algún decreto supremo.

Se utilizan los procedimientos y metodologías para la determinación de peligrosidad que establece el Ministerio de Salud en el Decreto N°148/2004 para descartar que estos de AEE sean considerados residuos peligrosos, las empresas una vez que tengan panel solar en desuso deberán presentar la caracterización de peligrosidad, mediante un estudio elaborado por laboratorios acreditados que presten aquel servicio.

## 2 PROBLEMA

El crecimiento de la industria fotovoltaica considera una acelerada extracción de materias primas para la fabricación de los módulos fotovoltaicos como consecuencia del modelo socioeconómico consumista de estos aparatos, los cuales, por el deterioro, la reposición con otros sistemas más eficaces o el fin de la vida útil, se consideran residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

Actualmente, estos remanentes se rigen por la Ley N°20.920, más conocida como ley REP que “Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje”. Los paneles solares son considerados productos prioritarios que deberán ser gestionados por recicladores autorizados y registrados, siendo responsables de que se realice esta acción los fabricantes. Pero, ciertos elementos que componen el panel solar quedan fuera del objetivo de la respectiva ley REP, si es que no se integra la tecnología que permita al gestor valorizar el material dentro del mercado chileno.

Por otro lado, las empresas generadoras de energía al producir residuos podrán demostrar ante la autoridad sanitaria, conforme a lo establecido 19 del DS 148/04 que los paneles solares no son residuos peligrosos, puesto que, algunos de sus componentes son parte de la lista B “no peligrosos” del artículo 90 de la misma ley. Sin embargo, los estudios toxicológicos y de peligrosidad que prueban a la autoridad sanitaria que los módulos fotovoltaicos no son residuos peligrosos, no consideran la acumulación progresiva de los elementos en grandes cantidades, que es lo que se proyecta que sucederá en unos años más.

Resulta preocupante el desconocimiento del real alcance que tiene la gestión de este tipo de residuos a nivel nacional, frente a la disposición y tratamiento que debe llevarse a cabo para los RAEE.

Lo anteriormente comentado, da cabida a la intención de proponer una alternativa clara para llevar a cabo la disposición final de los paneles solares que disminuya los posibles impactos a la salud humana y del medioambiente.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Proponer un plan de manejo de los residuos sólidos de paneles solares, al finalizar su vida útil en una planta fotovoltaica.

#### **3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Recopilar información acerca del proceso de gestión de los paneles solares en desuso derivados de los proyectos fotovoltaicos.
- Determinar los componentes de un módulo fotovoltaico que son valorizables en el mercado nacional.
- Comparar distintas formas de reciclaje para los componentes de paneles fotovoltaicos.
- Elaborar un plan de manejo para los residuos sólidos.

## 4 METODOLOGÍA

**Objetivo específico 1: Recopilar información acerca del proceso de gestión de los paneles solares en desuso en los proyectos fotovoltaicos.**

### ETAPA I: POBLACIÓN DE ESTUDIO

En primer lugar, se determinó que la población de estudio son los proyectos de parques fotovoltaicos que estén en operación al año 2022 de la Región de Valparaíso.

Para determinar el marco de muestreo se utilizará la información proporcionada por la base de datos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que, de acuerdo el artículo 8 de la Ley N° 19.3000/1994 sobre las Bases Generales del Medio Ambiente, los proyectos o actividades señalados en el artículo 10 sólo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto de su impacto ambiental. Finalmente, en este caso, los proyectos que serán seleccionados fueron sometidos al SEIA por cumplir con el literal “c) Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW”.

Los criterios de búsqueda que serán utilizados en la plataforma del SEIA para determinar los proyectos de generación con tecnología fotovoltaica son los que se muestran en la *Figura 4.1*.

The image shows a screenshot of a search criteria form on the SEIA platform. The form includes several sections with checkboxes and input fields:

- Nombre de Proyecto:** An empty text input field.
- Folio del Expediente:** A text input field containing "Ej. 2018-99-2".
- Región:** A grid of checkboxes for various Chilean regions. "Interregional" and "Región de Valparaíso" are checked.
- Tipo de presentación:** Radio buttons for "EIA", "DIA", and "AMBOS". "AMBOS" is selected.
- Fecha de presentación:** "Desde" and "Hasta" date pickers.
- Fecha de calificación:** "Desde" and "Hasta" date pickers.
- Estado del proyecto:** A grid of checkboxes for project statuses. "Aprobado" is checked.
- Sectores Productivos:** A grid of checkboxes for economic sectors. "Energía" is checked.

**Figura 4.1:** Criterios de búsqueda de proyectos fotovoltaicos en la plataforma del SEIA.  
Fuente: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

## ETAPA II: RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos se realizó mediante la revisión de los documentos que están disponibles en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de cada proyecto fotovoltaico que ha sido seleccionado como población de estudio.

Se focalizó la búsqueda en recopilar información específica acerca del manejo que se le está dando a los paneles solares en desuso, se busca el nombre del fabricante y/o nombre de la empresa que gestiona el reciclaje y/o reutilización.

Por otro lado, a modo de determinar la cantidad de paneles solares que se proyecta ser considerado residuo al final de la vida útil de las plantas fotovoltaicas, se utilizaron el inicio estimado del proyecto y vida útil del proyecto para determinar en qué año se provee generaron dichos residuos.

Cabe señalar que, dado el foco de esta investigación, sólo se consideró la caracterización del módulo fotovoltaico y no de otras componentes de los proyectos, como los inversores, estructuras de seguimiento, transformadores y otros.

Se registraron todas las respuestas en una planilla de cálculo identificando:

- Nombre del proyecto y titular
- Vida útil del proyecto
- Fecha estimada de inicio de la operación
- Cantidad de paneles solares
- Capacidad instalada
- Manejo de los paneles solares en desuso

La información obtenida será presentada en el presente informe de manera escrita y sintetizada mediante gráficos.

**Objetivo específico 2: Determinar los componentes de un módulo fotovoltaico que son valorizables en el mercado nacional.**

### ETAPA III: IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO

En primera instancia, de acuerdo con la recolección de datos pertinentes de los proyectos fotovoltaicos de la Región de Valparaíso se seleccionó el modelo de panel solar más utilizado en la industria como objeto de estudio.

Para identificar los componentes del módulo fotovoltaico se llevó a cabo un proceso de revisión bibliográfica, el cual se enfocó en buscar información en libros, revistas de divulgación o de investigación científica y sitios Web.

Se organizaron los documentos encontrados de manera sistemática, la cual fue ordenada en carpetas que tengan relación con el tema anteriormente mencionado, en donde se identificó cada documento por título, autor, revista y aporte. También se distinguió la relevancia entre los principales documentos y los secundarios, esto, mediante la numeración antepuesta del nombre. Con la información ya organizada se analizó el aporte de estas referencias para dar cumplimiento al objetivo.

### ETAPA IV: ALCANCE DEL MERCADO NACIONAL DE ACUERDO CON LOS COMPONENTES DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

El alcance inicia desde que un panel solar se ha dado de baja en una planta fotovoltaica. Para el estudio de mercado, es en relación con los materiales que componen el panel solar identificados anteriormente, y se consideraron las empresas de manejo y retiro de los paneles solares que fueron determinadas en la etapa de recolección de datos.

Se buscó los medios de contacto que permitan determinar las actividades que se llevan a cabo en esta industria y el uso final que les dan a los componentes que reciclan en sus instalaciones.

Mediante una tabla se indicó en sus columnas el gestor y la valorización que se le da a cada componente que conforma el módulo fotovoltaico.

### Objetivo específico 3: Comparar distintas formas de reciclaje para los paneles fotovoltaicos.

#### ETAPA V: COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RECICLAJE

En esta etapa se buscó información de acuerdo con el proceso que se lleva a cabo en los tres métodos de reciclaje: mecánico, térmico y químico. La búsqueda se hizo de manera exhaustiva en libros, revistas de divulgación o de investigación científica y sitios Web. Se enfocó la investigación en recopilar información del tipo de maquinaria, consumo de energía, emisión de CO<sub>2</sub>, residuos sólidos generados no valorizables (tasa de recuperación); lo cual se sintetizará en flujos de entrada y salida de cada método.

Para realizar cálculos, se utilizó un panel solar como unidad funcional. El cual corresponde a el modelo de panel solar anteriormente seleccionado.

Posterior a esto, se realizaron las correlaciones entre los flujos por los que pasa la unidad funcional a lo largo de los alcances y se interpretan los resultados. Una vez realizada la comparación de los métodos de reciclaje es posible discernir que método es el más adecuado para ser implementado en el plan de manejo para los residuos sólidos.

$$VMR = NI + C + OP + D + T$$

**Ecuación 4.1.**  
Valoración general de los métodos de reciclaje.

Donde:

*VMR, corresponde a la valoración del método de reciclaje*

*NI, corresponde a la ponderación del criterio de nivel de información*

*C, corresponde a la ponderación del criterio de complejidad del proceso*

*OP, corresponde a la ponderación del criterio de necesario otro proceso*

*D, corresponde a la ponderación del criterio de probabilidad de causar daño a los componentes*

*T, corresponde a la ponderación del criterio de tiempo*

#### 1) NIVEL DE INFORMACIÓN

Se evaluó el nivel de información recolectada del método de reciclaje, en la tabla 4.1, lo que determina su puntuación es el nivel de detalle en comparación a los otros métodos.

**Tabla 4.1:** Criterios de evaluación del nivel de información del método de reciclaje de un panel solar en desuso. Elaboración propia.

Criterio	Descripción	Valor
Alto	El nivel de información del método de reciclaje en comparación a los otros tiene más detalle.	3
Medio	El nivel de información del método de reciclaje no tiene mucha información.	2
Bajo	El nivel de información del método de reciclaje en comparación a los otros tiene menos detalle.	1

## 2) COMPLEJIDAD DEL PROCESO

La complejidad del proceso es un aspecto que se valorizó en función de tres criterios: (1) Alto. (2) Medio, y, (3); Bajo. Se detalla la descripción de la valorización en la siguiente tabla.

**Tabla 4.2:** Criterios de evaluación del nivel de complejidad del método de reciclaje de un panel solar en desuso. Elaboración propia.

Criterio	Descripción	Valor
Bajo	El procedimiento que se debe llevar a cabo para separar los componentes del panel solar no es complicado de entender y realizar (demora tres horas hombre y es necesario tener una especialidad). No es necesario realizar más de una capacitación.	3
Medio	El procedimiento que se debe llevar a cabo para separar los componentes del panel solar no es complicado de entender y realizar (demora seis horas hombre y es necesario tener una o más especialidades). Es necesario realizar dos capacitaciones.	2
Alto	El procedimiento que se debe llevar a cabo para separar los componentes del panel solar es complicado de entender y realizar (demora seis o más horas hombre y es necesario tener dos especialidades). Se deben realizar tres capacitaciones.	1

## 3) NECESARIO OTRO PROCESO

Si el proceso general de separación de los componentes del panel solar necesita aplicar dos métodos de reciclaje el criterio sería "Sí" y de lo contrario, es decir, solo se lleva a cabo un procedimiento para realizar el método de reciclaje el criterio sería "No".

**Tabla 4.3:** Criterios de evaluación de otro proceso para el método de reciclaje de paneles solares en desuso. Elaboración propia.

Criterio		Valor
No	No es necesario llevar a cabo otro procedimiento previamente para empezar con el método de reciclaje.	3
Sí	Es necesario llevar a cabo otro procedimiento previamente para empezar con el método de reciclaje.	1

## 4) PROBABILIDAD DE CAUSAR DAÑO A LOS COMPONENTES

La probabilidad de dañar el resto de los componentes es un aspecto que se valorizó dependiendo si es afirmativo o negativo. Teniendo mayor valor que no cause ningún cambio a los materiales que conforman el panel solar.

**Tabla 4.4:** Criterios de evaluación de probabilidad de causar daño a los componentes del panel solar. *Elaboración propia.*

Criterio	Descripción	Valor
No	El modo en que se aplica el método de reciclaje no causa daño a los materiales del módulo FV.	3
Sí	Existe la posibilidad de dañar los componentes del módulo FV durante la aplicación del método de reciclaje.	1

#### 5) TIEMPO

El tiempo que toma realizar todo el proceso de método de reciclaje es relevante a tomar en consideración, debido a la gran cantidad de paneles solares que se proyecta tener como residuo en unos años más.

Los criterios están de acuerdo del tiempo que se toma por un panel solar. El valor tres corresponde a “Bajo”, ya que, el tiempo que toma el método es de una hora o menos. Por otra parte, el criterio “Alto” toma más de un día en llevarse a cabo el procedimiento por completo y el nivel “Medio” sólo considera un día de tiempo para concretarse la finalidad del método.

**Tabla 4.5:** Criterios de evaluación del tiempo del método de reciclaje de paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

Criterio	Descripción	Valor
Bajo	El procedimiento toma menos de una hora en realizarse por completo.	3
Medio	El procedimiento toma menos de un día en realizarse por completo.	2
Alto	El procedimiento toma más de un día en realizarse por completo.	1

#### **Objetivo específico 4: Elaborar un plan de manejo para los residuos sólidos.**

##### **ETAPA VI: ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANEJO PARA LOS RESIDUOS SÓLIDOS**

Previo a la elaboración de un plan de manejo para los residuos sólidos, se deberá evaluar el estado inicial que tienen los proyectos fotovoltaicos.

Ahora, para cuantificar el proceso de gestión, tratamiento y la disposición final de los componentes de un panel solar, se realizó una evaluación combinada de la ponderación de una serie de criterios (expuestos en las secciones siguientes) definidos por cada una de las variables que componen la función de la evaluación inicial, así mismo se le asignó un mayor peso al método de reciclaje, ya que de esta manera se puede asegurar que el proceso tenga mejores resultados, es decir, se revalorice mayor cantidad de materiales con un menor gasto energético. En base a esto, el método de cálculo que se realizó es a partir de la siguiente ecuación:

$$EI = A + T + R + G + E + 2$$

#### **Ecuación 4.2.**

Evaluación inicial del procedimiento de gestión de paneles solares en desuso.

Donde:

*EI, corresponde a la evaluación inicial*

*A, corresponde a la ponderación del criterio de almacenamiento*

*T, corresponde a la ponderación del criterio de transporte*

*R, corresponde a la ponderación del criterio de registro*

*G, corresponde a la ponderación del criterio de gestión*

*E, corresponde a la ponderación del criterio de empresa*

*M, corresponde a la ponderación del criterio de método*

A continuación, se presentan los criterios de evaluación del estado antes de para llevar a cabo la elaboración de un plan de manejo.

#### **1) ALMACENAMIENTO**

La consideración del almacenamiento es un aspecto que se valorizó en función de tres criterios: (1) existe un lugar específico y se encuentra referenciado, (2) existe lugar de acopio, pero no se puede utilizar, y, (3); inexistencia de un lugar específico siendo éste último la posición más inaceptable, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 4.6:** Criterios de evaluación del almacenamiento de paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

Criterio	Descripción	Valor
No existe un lugar específico para el acopio de paneles solares.	Los paneles solares son dispuestos en cualquier sitio del predio.	3
Existe un lugar de acopio, pero este se encuentra lleno.	Al no contar con lugar de acopio los paneles solares son dispuestos en otro lugar, sin especificar donde y cuando serán dispuestos en un sitio exacto para almacenar.	2
El lugar de acopio cuenta con espacio y esta referenciado.	Se cuenta con una bodega o sector referenciado, personal tiene en conocimiento del lugar en exactitud. Existen señalizaciones que faciliten la ruta para el transporte.	1

## 2) TRANSPORTE

En la tabla 4.7 el transporte por parte del personal será evaluado según criterios de preparación para realizar esta acción, en el mejor de los casos, los responsables de transportar los paneles solares degradados poseen implementos de protección personal que resguardan su seguridad, además se considera si existen capacitaciones por parte de supervisores hacia los trabajadores, permitiendo un manejo adecuado del elemento hacia el lugar de acopio.

**Tabla 4.7:** Criterios de evaluación del transporte de paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

Criterio	Descripción	Valor
No existen responsables específicos para el manejo de los paneles solares degradados. No se cuenta con capacitaciones, ni implementos de protección personal.	El personal encargado de transportar los paneles solares al lugar de acopio no cuenta con implementos de protección personal. La empresa no considera realizar capacitaciones sobre el manejo de este residuo. Tampoco existen cargos específicamente responsables de estas acciones.	3
Hay cargos específicamente responsables del manejo de paneles solares degradados, pero no se cuenta con capacitaciones, ni implementos de protección personal.	El personal encargado de transportar los paneles solares al lugar de acopio esta supervisado por cargos específicamente responsables de que se lleve a cabo un buen procedimiento de acopio. Pero la empresa no considera realizar capacitaciones sobre el manejo de este residuo, ni entrega implementos para la protección personal.	2
Existen cargos responsables de supervisar el transporte de los paneles solares degradados. El personal cuenta con capacitaciones y se les entrega implementos para su protección.	Los supervisores del personal se encargan de realizar capacitaciones que permitan transportar los paneles solares al lugar de acopio de manera correcta, además entregan implementos de protección personal.	1

### 3) REGISTRO

Que la empresa tenga un registro de sus residuos es fundamental para realizar la gestión adecuada de ellos, por lo tanto, en esta parte de la evaluación se toma como pauta la realización de una ficha que cumpla con requisitos mínimos de identificación del residuo, contar con fecha de almacenamiento en la bodega, características del residuo y si cuenta con la especificación de la cantidad de peso y/o volumen.

**Tabla 4.8:** Criterios de evaluación del registro de los paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
No se registra la cantidad en peso y/o volumen del residuo (panel solar). Tampoco se identifican las características del residuo.	Al transportar en los lugares de acopio los paneles solares en desuso, no se considera realizar una ficha con: la fecha en que fue considerado un residuo, cantidad peso y/o volumen, ni sus características.	3
Se registra la cantidad en peso y/o volumen del residuo (panel solar). No se identifican las características del residuo.	Los paneles solares en desuso que fueron almacenados se les realiza una ficha identificando la cantidad peso y/o volumen. Pero no se incluye la fecha en que fue considerado un residuo, ni sus características.	2
Se registra en una ficha la cantidad en peso y/o volumen del residuo (panel solar) y sus características.	A los paneles solares en desuso que fueron almacenados en un lugar de acopio específico son identificados en una ficha con: la fecha en que fue considerado un residuo, cantidad peso y/o volumen y sus características.	1

### 4) GESTIÓN

En el ámbito de la gestión los criterios de evaluación están enfocados en lo que ha comprometido la empresa a hacer para gestionar los paneles solares en desuso, siendo el caso más desfavorable, el derivar la gestión de este residuo a la empresa fabricante, puesto que, en ese caso, se perderá total conocimiento de lo que realmente harán con el panel solar.

**Tabla 4.9:** Criterios de evaluación de la gestión de paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Se deriva la gestión de los paneles solares en desuso a la empresa fabricante extranjera.	Se considera en los documentos ingresados al SEIA, derivar la gestión de los paneles solares en desuso a la empresa fabricante, la cual es extranjera.	3
Se deriva la gestión de los paneles solares en desuso a la empresa fabricante nacional.	Se considera en los documentos ingresados al SEIA, derivar la gestión de los paneles solares en desuso a la empresa fabricante, la cual gestiona los con empresas nacionales inscritas, según ley REP.	2
Gestiona los paneles solares en desuso una empresa nacional inscrita.	Se considera en los documentos ingresados al SEIA, gestionar los paneles solares en desuso con empresas nacionales inscritas, según ley REP.	1

## 5) EMPRESA

Escoger un gestor adecuado es parte del proceso que deben realizar los proyectos que se comprometieron en su DIA a realizar el acto de gestionar con empresas nacionales inscritas según lo que indica la ley REP, pero se debe examinar la cercanía que tienen estas empresas de los proyectos fotovoltaicos.

Otros factores que se deben considerar es el cómo van a realizar la segregación de los elementos que componen el panel solar y cuál es la finalidad que le dan, por lo que, en la tabla 4.10 se mencionan los criterios para evaluar el mejor caso (1).

**Tabla 4.10:** Criterios de evaluación de la empresa encargada de gestionar los paneles solares en desuso. Elaboración propia.

Criterio	Descripción	Valor
La empresa que se considera para la gestión paneles solares en desuso está lejos del proyecto de generación de energía solar. Especifica el método de reciclaje.	La empresa gestora de los residuos (paneles solares) está inscrita, pero se ubica en una región diferente al parque fotovoltaico. Especifica el método de reciclaje y la finalidad de los materiales segregados (valorización).	3
La empresa que se considera para la gestión paneles solares en desuso es cercana al proyecto de generación de energía solar, pero no especifica el método de reciclaje.	El gestor de los paneles solares en desuso es una empresa inscrita y se ubica en la misma región que el parque fotovoltaico. Esta no especifica el método de reciclaje que será utilizado para segregar los componentes del panel, ni tampoco sabe que valorización que le dará a aquellos materiales.	2
La empresa que se considera para la gestión paneles solares en desuso es cercana al proyecto de generación de energía solar y especifica el método de reciclaje.	La empresa gestora de los paneles solares está inscrita y se ubica en la misma región que el parque fotovoltaico, se considera cercana. Esta especifica el método de reciclaje que será utilizado para segregar los componentes del panel y también tiene clara la revalorización que le dará a aquellos materiales.	1

## 6) MÉTODO

Los criterios para evaluar los métodos de reciclaje están de acuerdo con los resultados de la etapa V, para definir los criterios se toma en cuenta el menor consumo de energía y el mejor rendimiento para la recuperación de materiales.

**Tabla 4.11:** Criterios de evaluación del método de reciclaje de paneles solares en desuso. *Elaboración propia.*

Criterio	Descripción	Valor
El método de reciclaje en comparación a los otros es menos eficiente.	El método de reciclaje en comparación a los otros es menos eficiente en términos de uso de energía y tasa de recuperación.	3
El método de reciclaje es el segundo más eficiente en términos de uso de energía y tasa de recuperación.	El método de reciclaje en comparación a los otros es segundo más conveniente en términos de uso de energía y tasa de recuperación.	2
El método de reciclaje es el más conveniente según comparación.	El método de reciclaje en comparación a los otros es más conveniente en términos de uso de energía y tasa de recuperación.	1

## CASO CERO

El caso cero del proyecto corresponde al mejor de los casos para realizar la gestión de paneles solares degradados, de ser la evaluación inicial mayor a este puntaje, deberán analizar mejoras en el proceso de gestión de los residuos de esta clase.

**Tabla 4.12:** Cálculo de la ponderación total del caso cero. *Elaboración propia.*

A	T	R	G	E	M	Total	Evaluación
1	1	1	1	1	2	7	Excelente

**Tabla 4.13:** Rangos para determinar la calificación de la evaluación. *Elaboración propia.*

Total ponderado	Evaluación
7	Excelente
De 8 a 10	Muy buena
De 11 a 15	Buena
De 16 a 21	Mala

Para realizar esta etapa de la metodología y finalmente lograr elaborar un plan de manejo de los residuos sólidos, se partió de un caso hipotético en donde la evaluación inicial fue mala, por lo que, se buscará idear una propuesta de plan de manejo de estos residuos que logre cumplir con una evaluación excelente.

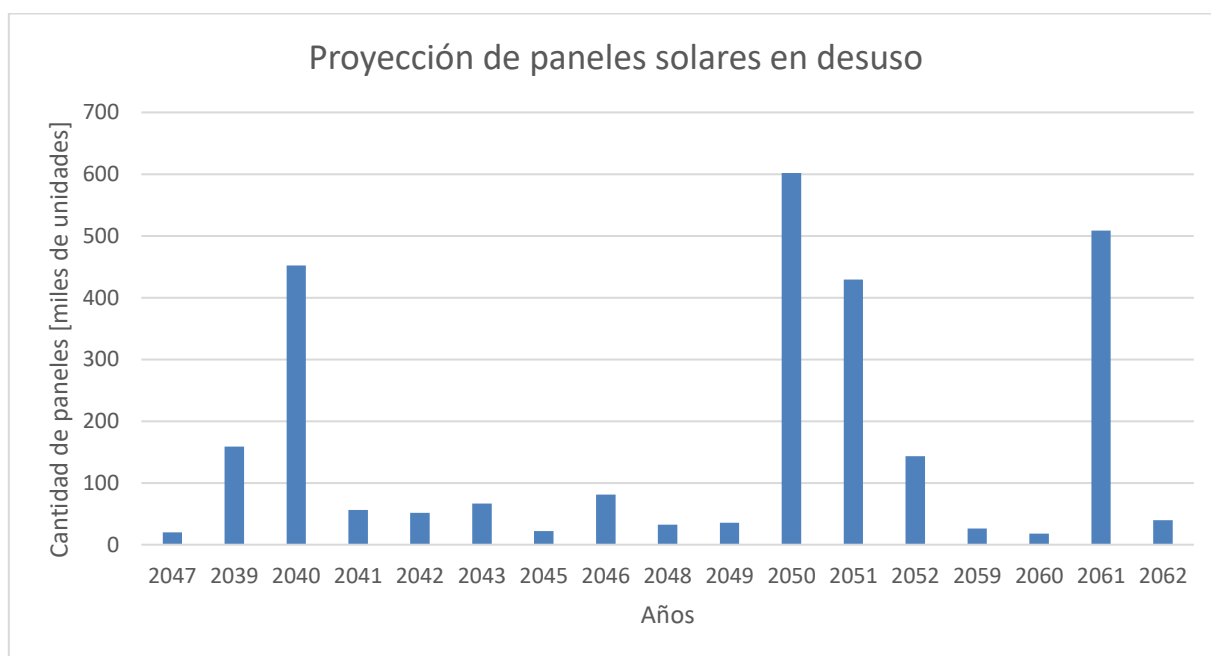
Se tomaron en consideración todos los criterios utilizados para la evaluación, en donde se planteó que hacer en los casos más desfavorables.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: RECOPIRAR INFORMACIÓN ACERCA DEL PROCESO DE GESTIÓN DE LOS PANELES SOLARES EN DESUSO EN LOS PROYECTOS FOTOVOLTAICOS.

La población de estudio que se consideró para recopilar información del proceso de gestión de paneles solares en desuso son 53 proyectos de parques fotovoltaicos que están en operación en el año 2022, que varían entre los 3 MW a los 175 MW de potencia instalada.

Considerando la fecha de inicio estimada y la vida útil del proyecto se proyecta en la *Figura 5.1* la cantidad de paneles solares en desuso en los siguientes años, como resultado se denota que para el año 2040 la cantidad de paneles solares considerados residuos en la Región de Valparaíso será considerable.



**Figura 5.1:** Proyección de paneles solares en desuso. Elaboración propia.

Una vez que deja de considerarse funcional un módulo fotovoltaico los proyectos optan por dos alternativas para manejar este residuo. Según la recolección de información sobre la interrogante surgen las siguientes propuestas:

### 5.1.1 Programa de reciclado:

La empresa fabricante es quien se encargaría de llevar a cabo el programa de reciclaje. Este programa consta de distintas etapas que permite que prácticamente todos los componentes de los módulos, incluidos el vidrio y el material semiconductor encapsulado, sean tratados y transformados en nuevos módulos y otros productos. A continuación, se detalla en qué consisten aquellas etapas:

- **Recolección:** Los paneles se recogen en tolvas desde la planta fotovoltaica y son trasladados hacia la empresa de origen (fabricante). Una vez en la fábrica los trabajadores mediante una carretilla dirigen el contenido a una trituradora.
- **Compactación:** Se reduce el tamaño del contenido por la acción de la trituradora, la cual rompe el cristal en pedazos grandes.
- **Molino de martillo:** Los vidrios rotos son aplastados por el molino de martillo y disminuyen el tamaño de los trozos a 45 milímetros.
- **Remoción de la película:** El semiconductor posee una película que es removida físicamente al añadirle ácido sulfúrico, esto se realiza al principio del ciclo, y se le añade peróxido de hidrógeno a lo largo del ciclo para facilitar el proceso.
- **Separación sólido-líquido:** Se vacía lentamente el contenido en un clasificador, el cual separa el líquido del vidrio.
- **Separación del material vidrio-laminado:** Se separa el vidrio de las piezas más grandes de EVA mediante una pantalla vibrante.
- **Lavado de vidrio:** el vidrio es lavado para eliminar los residuos de material semiconductor que se mantiene en el cristal.
- **Precipitación:** Los componentes de metal separados se concentran en un tanque de espesamiento y el material que resulta del filtrado está acondicionado para la recuperación de metales por un tercero. Los metales son reciclados en productos comerciales o nuevos paneles solares.

Una vez realizado este procedimiento la empresa fabricante otorga una certificación escrita que los módulos fueron procesados. En caso de que no se cuente con una entidad que recicle los módulos, serán enviados a la agencia más próxima. En caso de que el traslado sea transfronterizo

el control estará sujeto al Convenio de Basilea, que regula los desechos peligrosos y su eliminación, de esta manera se garantiza la protección de la salud humana y del medio ambiente.

En algunos casos, los módulos fotovoltaicos que están certificados y que pertenecen a la asociación PV-CYCLE que es una entidad sin fines de lucro, sostenida por sus miembros, que ofrece soluciones especializadas de gestión de residuos y servicios para el cumplimiento normativo a empresas con residuos de cualquier tipo.

#### 5.1.2 Disposición final en relleno sanitario autorizado:

Bajo el supuesto de que el panel solar es un residuo no peligroso, ya que sus componentes no son considerados como materiales peligrosos o perjudiciales, tanto para las personas como para el medio, respaldado por la Normativa Europea N°65/EU (2011), y que, además, los módulos a utilizar presentan la certificación internacional ISO 14001 “Environmental Managemet System”.

Estos son trasladados por una empresa autorizada por el Seremi de Salud de la Región de Valparaíso que presente certificado de que el residuo fue dispuesto en un sitio que cumpla con el DS 148/04 o bien reciclado por alguna empresa acreditada para efectuar aquel proceso.

En este caso, se considera el almacenamiento en bodegas de acopio temporal y el retiro sea cada 6 meses, cada mes o dependiendo de la cantidad. También existen empresas que no tienen lugar de almacenamiento, pues el retiro de estos paneles es diario.

A modo de síntesis existe un mayor porcentaje de proyectos que derivan este residuo sólido a una empresa autorizada para disposición final en relleno sanitario autorizado o de ser posible realizar reciclaje, mencionándose solo una empresa gestora de paneles solares “Hidronor Pudahuel”, la cual se ubica en Santiago.

Son 21 proyectos los que delegan la gestión de estos residuos a los fabricantes de los paneles solares, destacando que la gran parte tiene un convenio con la asociación PV-CYCLE.

Solo cinco empresas mencionan el nombre los proveedores, siendo estos, Jinko Solar y CanadianSolar.

## 5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: DETERMINAR LOS COMPONENTES DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO QUE SON VALORIZABLES EN EL MERCADO NACIONAL.

De acuerdo con la recolección de datos que se llevó a efecto para esta industria en la Región de Valparaíso, veinte proyectos mencionan la tecnología que usa su empresa dentro de los cuales once de ellos ocupan módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino y nueve proyectos aprovechan la tecnología de silicio policristalino. La potencia suministrada por los módulos varía entre los 350-650 Vatios pico (Wp).

Se precisó como guía la ficha técnica de un panel solar de silicio monocristalino con similares especificaciones de los que comúnmente se usan en los parques fotovoltaico de la región. Se escogió como referencia el modelo Eagle PERC 72 comercializado por la marca Jinko Solar, el cual según fábrica se encuentra certificado para determinar cuánto material hay en un panel solar. La potencia de este producto va de los 340 a 360 W, su peso es de 26,5 kg y sus dimensiones son 1956 x 992 x 40 mm. Otras características del objeto de estudio se presentan en la tabla 5.1, la ficha técnica completa del producto puede encontrarse en el anexo.

**Tabla 5.1:** Características de un panel solar fotovoltaico de celdas monocristalinas. Fuente: Jinko Solar, 2022.

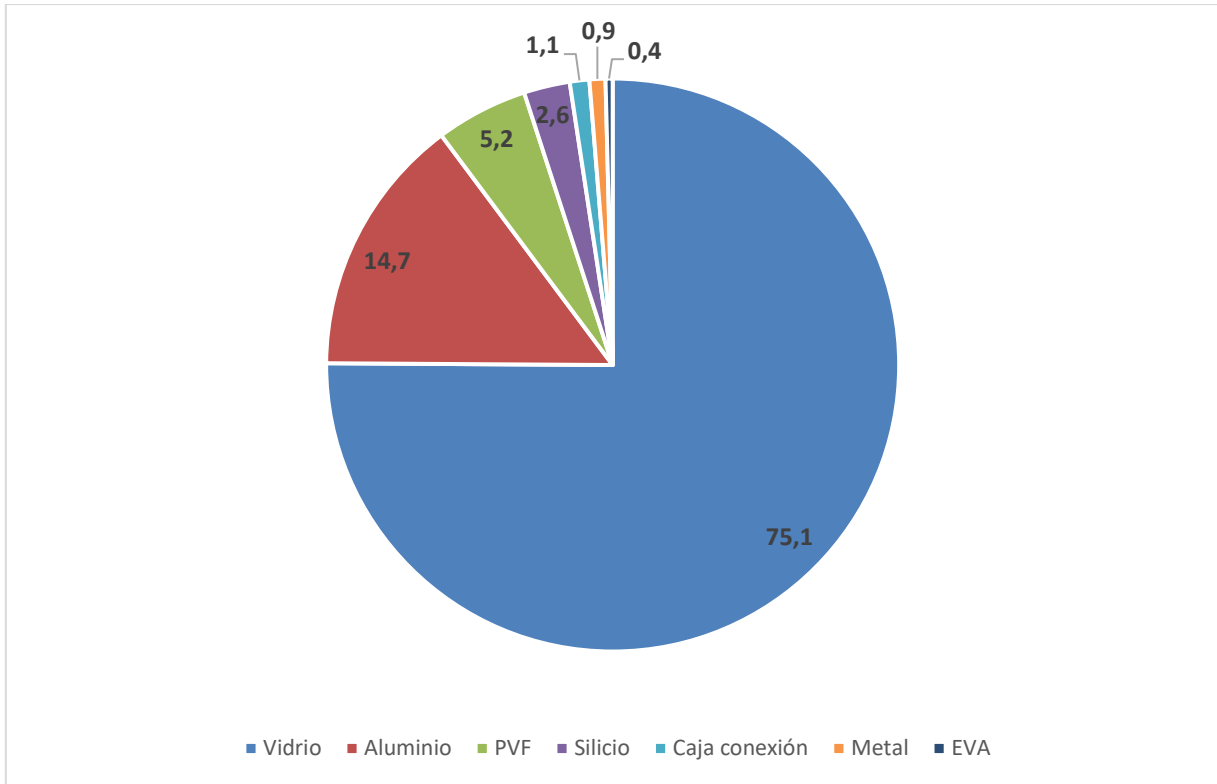
Especificaciones	
Modelo	Eagle PERC 72
Potencia	340-360W
Tensión en el punto de máxima potencia (Vmax)	39,5 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	9,12 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	48 V
Eficiencia	18,55 %
Temperatura nominal de funcionamiento de célula	45 +/- 2°C
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0,39 %/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0,29 %/°C
Tipo de célula	Monocristalino
Tamaño de las células	156 x 156 mm
Número de células	72
Tipo de vidrio	Templado, capa antirreflejo
Grosor de vidrio	4 mm
Encapsulado de células	EVA
Tipo de trama	Aleación de aluminio anodizado

### 5.1.1 Componentes

- Marco de aluminio: El segundo componente de mayor porcentaje es el aluminio que conforma el marco del panel, este modelo tiene una aleación de aluminio anodizado.

- Vidrio: El material que se encuentra en mayor cantidad en los paneles fotovoltaicos es el vidrio, en este caso, el vidrio es templado bajo en hierro de 4.0 mm de espesor con revestimiento antirreflejante y de alta transmisión.
- Encapsulante: El elemento transparente del encapsulante más utilizado comercialmente son las capas de etileno acetato de vinilo (EVA) (Wiesmeier, et. al., 2012), también existe la opción de utilizar polivinilo butiral (PVB) (Ramírez & Vargas, 2021). El único inconveniente de estos materiales es que no son resistentes al elevado nivel de la radiación ultravioleta (UV) sino que su función es evitar la entrada de aire o humedad, siendo necesario recubrir las láminas de los módulos fotovoltaicos con fluoruro de polivinilo (PVF) para prevenir los efectos de la exposición prolongada de los rayos UV y además funciona como aislante eléctrico.
- Celdas solares monocristalinas: Las células fotovoltaicas para la conversión directa de energía solar en eléctrica utilizan obleas cortadas de cristales simples de silicio de grado electrónico (Lenntech, s.f., párr. 2). El número de celdas solares y su interconexión entre ellas son los componentes que más influyen en las dimensiones y el peso que tendrá finalmente el panel solar fotovoltaico.
- Caja de conexiones: En la parte posterior se ubica la caja de conexión del módulo solar, aquí se alojan todas las conexiones eléctricas de manera segura, esta sección tiene un área transversal de 4.0 mm<sup>2</sup> y longitud de 900 mm. Un mínimo fragmento de las células solares se constituye por metales que forman parte lo que se denominan dedos de rejilla y barras colectoras, los dedos de rejilla conducen la corriente hacia las barras colectoras que son delgadas tiras que van de forma rectangular en los lados frontal y posterior de la célula solar fotovoltaica. Lo que permite la unión de las celdas interconectadas con la caja de conexiones son cables de cobre o aluminio.

En 2020, Herrarte [18] estimó los porcentajes de los materiales en este modelo de paneles solares, concluyendo que se configuran mediante un 75,1% de vidrio, 14,7% de aluminio, 5,2% de PVF, 2,6% de silicio, 1,1% de la caja de conexión, 0,9% de metal y 0,4 de EVA.



**Gráfico 1:** Porcentaje de componentes de un panel solar. Fuente: Herrarte, 2020.

Tomando en cuenta las medidas registradas en el estudio de Herrarte, quien desmontó paneles solares de 40 W para considerar el peso de cada componente en comparación con el peso total para finalmente estimar los porcentajes de cada componente del panel, consiguiendo de esta manera el porcentaje en peso del módulo estándar. Las ecuaciones realizadas para obtener los resultados de la tabla 5.2 son las siguientes:

$$\%v = \frac{P_v}{P_t}$$

Donde:

$\%v$ , corresponde al porcentaje del componente en la muestra  
 $P_v$ , corresponde al peso del componente luego del tratamiento  
 $P_t$ , corresponde al peso total de la muestra

**Ecuación 4.2.**

Porcentaje en peso del componente en el panel solar

$$PT_v = PT_t * \%v$$

Donde:

$PT_v$ , corresponde al peso del componente del panel solar  
 $\%v$ , corresponde al porcentaje del componente en la muestra  
 $PT_t$ , corresponde al peso total del panel solar

**Ecuación 4.3.**

Peso total utilizado por el componente en el panel.

**Tabla 5.2:** Material recuperado. Fuente: Herrarte, 2020.

Componente	Peso muestra (g)	Porcentaje (%)	Peso panel Eagle PERC 72 (g)
Vidrio	2.444	75,1	19.888,8
Marco de aluminio	479	14,7	3.897,5
Encapsulante	183	5,6	1487,9
Celdas solares monocristalinas	86	2,6	701,3
Caja conexión	35	1,1	284,8
Metal	29	0,9	239,7
<b>Panel completo</b>	<b>3257</b>	<b>100</b>	<b>26500</b>

### 5.2.2 Estudio de mercado

Con relación al estudio de mercado de los materiales del modelo de panel solar “Eagle PEC 72 Jinko Solar” se destaca la empresa Hidronor Pudahuel, que se menciona en un proyecto de la industria fotovoltaica dentro de su programa de gestión de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) expresando que se encargará de la gestión de sus paneles solares que se establecen como caducados.

Se indagó en otras empresas que se adaptan a realizar el retiro y manejo de los componentes del panel solar, encontrando un catálogo de empresas de valorización de residuos Región Metropolitana de Santiago [28] que separa por fracción de residuo las que podrían realizar la gestión. De acuerdo con los materiales que se reciclan se generó la tabla 5.3 que indica si el material puede ser reciclado o es desechado en un relleno sanitario.

**Tabla 5.3:** Escenario de reciclaje para los distintos componentes de un panel fotovoltaico. Elaboración propia.

Componente	Escenario de reciclaje
Vidrio	SI
Marco de aluminio	SI
Encapsulante	NO
Celdas solares monocristalinas	NO
Caja conexión	SI
Metal	SI

El uso que se le den a los componentes depende de la empresa que se haga cargo de la gestión, pero la valorización de los componentes de los paneles que actualmente presentan una utilidad en el mercado, es decir, el aluminio, el vidrio y el metal que pueda desprenderse después de pasar por alguno de métodos de reciclaje, se generaliza en la siguiente tabla 5.4, en donde también se habla de la reutilización del material en caso de que se pueda implementar nuevamente en los paneles solares que son nuevamente elaborados.

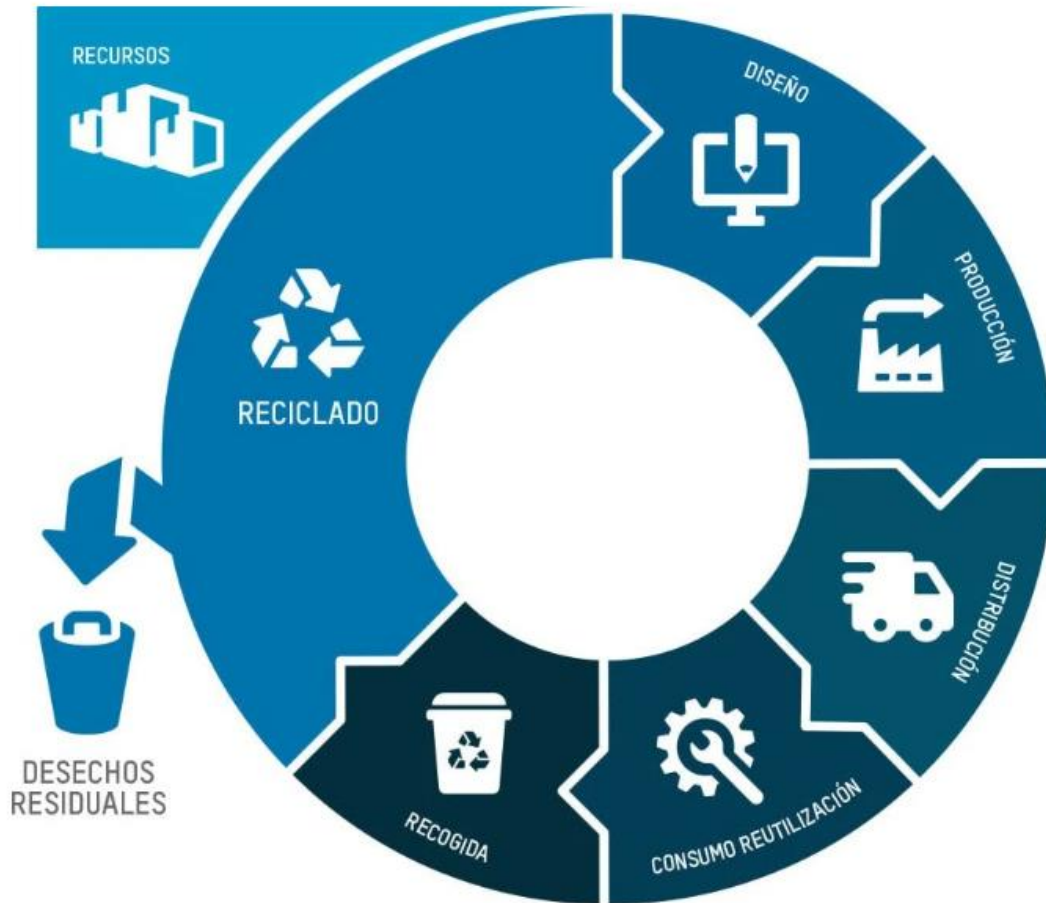
**Tabla 5.4:** Valorización de los componentes y empresas para su gestión. *Elaboración propia.*

Componente	Valorización	Empresas para revalorización
Vidrio	El caso del vidrio es más simple al tener solo dos niveles de recuperación, vidrio roto y vidrio intacto. El vidrio intacto es útil para generar una economía circular y reusar directamente en la elaboración de nuevos paneles. Mientras que puede reciclarse para crear nuevo vidrio o para subproductos como lana de vidrio.	Cristalerías Chile y Cristalerías Toro.
Marco de aluminio	La fundición de los marcos aluminio inicia el proceso de generación de otros elementos que estén compuestos de este material, también se puede reutilizar para formar nuevos paneles solares.	Industria Metalúrgica Sorena, SONAMET Sociedad Nacional Metalúrgica Ltda., Reciclajes Farex spa, Metalum, Metalúrgica y Mecánicas Midas Ltda.
Caja de conexión Metal	Se puede reutilizar para producir nuevos paneles solares. El reciclaje se puede realizar luego de separar las conexiones y caja de diodos, obteniendo cobre, estaño, silicio, estroncio.	

Se buscaron instancias de contacto mediante sus correos electrónicos y números telefónicos de las empresas anteriormente mencionadas, pero no se obtuvieron respuestas satisfactorias para determinar las actividades que se llevan a cabo en esta industria y el uso final que les dan a los componentes que reciclan en sus instalaciones. Sin embargo, se extrajo información de sus páginas web que permitió conocer el rubro que llevan las empresas que más se adaptan al proceso de gestión de los paneles FV.

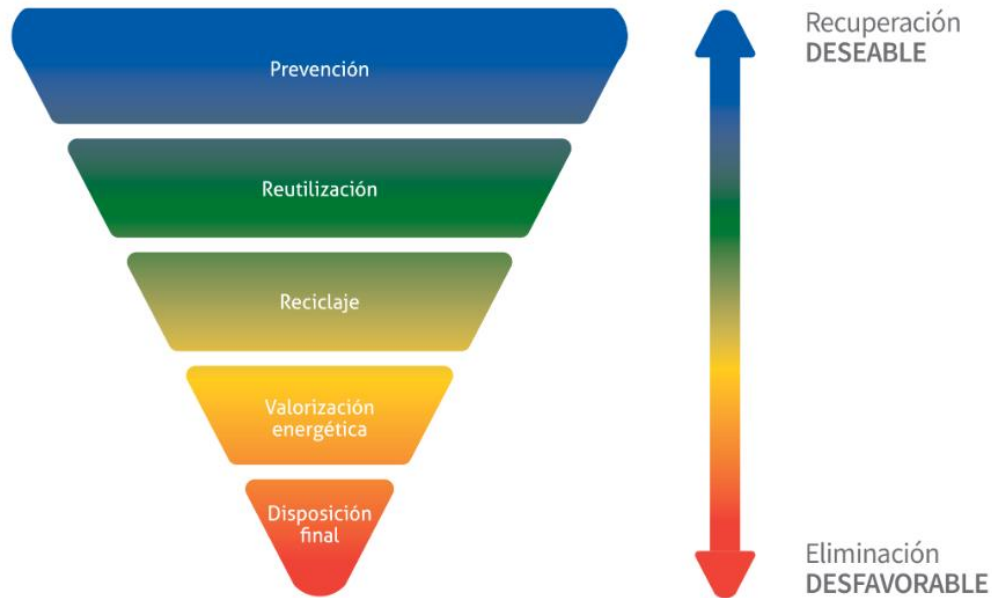
- Hidronor Pudahuel: Se destaca por realizar una gestión de productos fuera de estándar, certificado bajo las normas Internacionales ISO 14001 y ISO 45001. En primera instancia esta empresa declara y valida el residuo en sus laboratorios, caracterizando su peligrosidad, de esta manera se define el tratamiento específico que finalmente se realizará. Para el caso de los paneles solares tienen la opción de ser dispuestos en depósitos de seguridad, ser exportados, revalorizados o bien llevar a efecto un tratamiento que neutralice sus elementos para la disposición final. Una innovación que posee esta planta es la revalorización de los residuos para producir combustible alternativo, usando envases, chatarra, HDPE, plásticos, baterías, entre otros.
- Solarix y Submetal: En el tercer informe publicado por In-Data & Rigk en el año 2020, titulado “Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil” se menciona que existe un proyecto de reciclaje de módulos fotovoltaicos en Chile llevado a cabo por Solarix en alianza con Submetal. Esta planta tiene como objetivo brindar servicios de manejo y gestión

de paneles solares al finalizar su vida útil, que como se muestra en la *Figura 5.2* va desde el diseño de procedimiento hasta el reciclado de los materiales. Para lograr la correcta separación de los distintos componentes del panel el tipo de tratamiento que se ejecutará será de tipo mecánico, recuperando el vidrio, aluminio, cobre y celdas fotovoltaicas. El destino final de estos subproductos es el reciclaje en lugares autorizados en el mercado nacional o internacional.



**Figura 5.2:** Plan de reciclaje fotovoltaico de la planta de tratamiento. Fuente: Empresa Solarix.

- Degraf: Presta servicios de reciclaje de productos eléctricos y electrónicos. Diseña el proceso de acuerdo con la Jerarquía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), cuenta con todas las autorizaciones requeridas para el transporte y almacenamiento de residuos peligrosos (RESPEL) y no peligrosos. En esta empresa para lograr una gestión integral de los residuos utilizan una jerarquía de criterios, los cuales se pueden ver en la *Figura 5.3*.



**Figura 5.3:** Jerarquía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS). Fuente: Empresa Degraf.

- **Metalum:** La empresa se encarga de recibir, seleccionar, compactar, cortar, almacenar y comercializar metales no ferrosos, generados por terceros, consistentes en: latas de bebidas; perfiles de aluminio; aluminio blando (planchas y placas); aluminio duro (piezas fundidas); radiadores fabricados de aluminio, libre de todo tipo de líquidos.
- **Cristalerías Chile:** Una vez que se hace la recepción del vidrio se selecciona, almacena e industrializa el vidrio reciclado en hornos de fundición, que pasan por líneas de producción contempladas en las plantas y finalmente lo convierten en nuevos envases de distinto tipo que son comercializados.

### 5.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: COMPARAR DISTINTAS FORMAS DE RECICLAJE PARA LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.

Las publicaciones con respecto al tema que fueron revisadas van desde el año 2017 al 2022 [17-19] [21-22] [25-27], aquellas son en su mayoría informes que se realizaron para lograr una adecuada gestión de los desechos de paneles fotovoltaicos de silicio. El alcance de estos estudios en cuanto a los métodos utilizados para descomponer el panel solar no es muy específico en definir con exactitud el tipo de maquinaria, equipo o herramienta que se usa en el proceso, sino que solo son descripciones generales de lo que se lleva a cabo en otros países o bien, se explican procedimientos patentados pero que no se han llevado a cabo de manera industrial.

Conforme a la información recolectada se reconocen dos etapas que proporciona la recuperación de ciertos materiales del panel solar al finalizar su vida útil. Inicia con el proceso principal de remoción del marco de aluminio y caja de conexiones, llevado a cabo mediante un proceso mecánico simple para retirar dichos componentes. La segunda etapa se refiere a la eliminación de encapsulante, considerada la más difícil dentro de todo el proceso de reciclaje de los módulos FV; los enfoques para eliminar el encapsulante de las estructuras laminadas corresponden a tratamientos térmicos y químicos [21].

#### 1- Remoción del marco metálico y de la caja de conexiones

- Mecánico

El proceso de separación mecánica de los componentes de un módulo fotovoltaico consiste en la separación física de la estructura del panel mediante herramientas.

El desmantelamiento inicia en el desmontado del marco de aluminio y la caja de conexiones del resto del panel. En la investigación de Herrarte, se realizó el procedimiento partiendo por introducir una sierra metálica en las esquinas del marco de aluminio cortando la escuadra, luego con una cuchilla de mano se cortó el silicón que une el marco y finalmente se golpeó con un mazo de hule para extraer la estructura de aluminio. Con la misma cuchilla se cortó el silicón que une la caja de conexiones con el panel solar y mediante la acción de un destornillador eléctrico se separa por completo el marco de aluminio.

Por lo tanto, en este proceso se consideran el consumo de energía del destornillador eléctrico, el cual se emplea durante 55 minutos aproximadamente, por ende, se emite CO<sub>2</sub> a la atmosfera por el uso de electricidad.

Los materiales recuperados son principalmente el aluminio y los que componen la caja de conexiones. Derivando los siguientes componentes: celda solar, vidrio y encapsulante; los cuales no pueden ser utilizados en un proceso de economía circular [7]. Siendo el 84,2% del total del peso considerado material no valorizable.

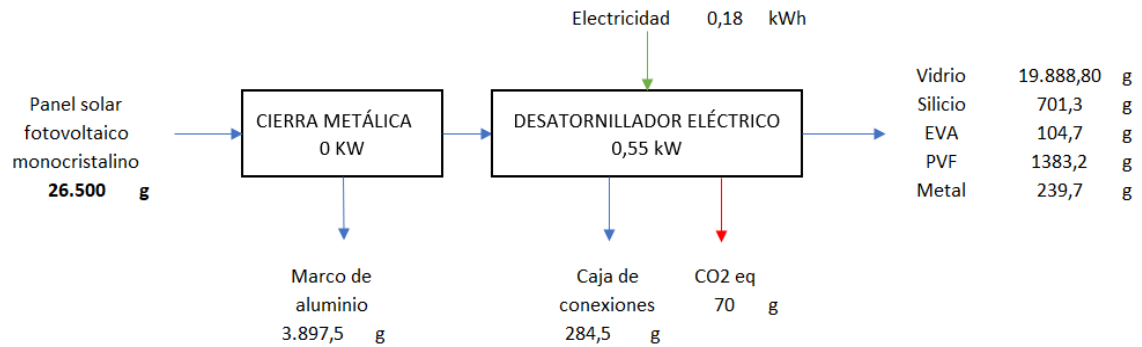


Figura 5.4: Diagrama para el reciclaje mecánico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia.

## 2- Eliminación de encapsulante y estructura laminada

- Térmico

Este procedimiento consiste en quemar los polímeros que componen el encapsulante, esto por medio de un horno que permita llegar hasta los 500°C y que trabaje a una atmósfera inerte, pues el oxígeno (O<sub>2</sub>) favorece la combustión del EVA. Herrarte (2020), realizó este proceso con un panel solar y concluyó que 450°C es una temperatura suficiente por emplear para eliminar el EVA por completo. La muestra que se recupera luego del tratamiento térmico es aproximadamente entre 85-95% vidrio, 3,4% silicio, 1,2% metal y siendo la diferencia el encapsulante. Dependiendo del tamaño de la mufla industrial se define el tiempo de utilización, puesto que, en algunos casos se deberá separar el panel para efectuar la quema del material deseado. Por lo tanto, el tiempo define el consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub>, en este caso se estimó un tiempo de 559 minutos. De este proceso también se obtiene un 84,2% de material no valorizable.

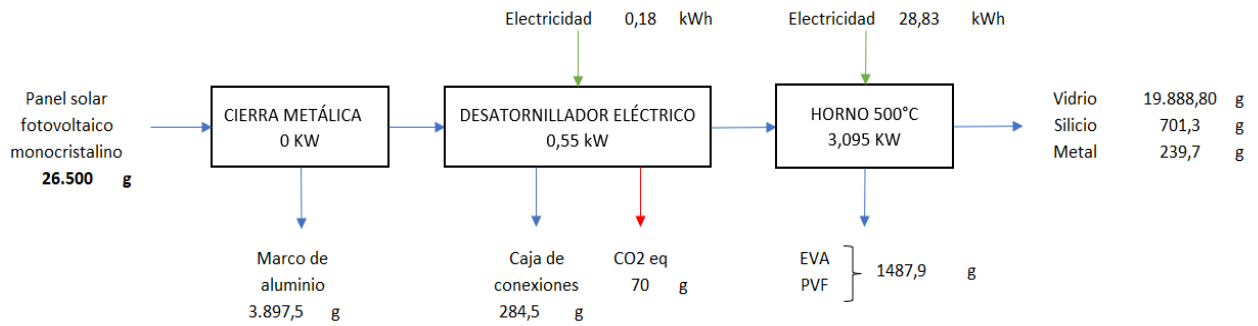


Figura 5.5: Diagrama para el reciclaje térmico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia.

- Químico

En el tratamiento químico se sumerge el módulo fotovoltaico en un solvente, de forma que los componentes sean separados por reacciones químicas. Se entiende que este tipo de tratamiento requiere más tiempo que el método térmico, pero tiene más rendimiento, puesto que, las células de silicio son recuperadas sin daño.

En 1990 BP Solar utilizó ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) como solvente, aplicándolo durante un día, disolviendo la encapsulación de polímeros; de esta manera se separó y recuperó el vidrio, las células de silicio y los metales, obteniendo un 84,2% de materiales no valorizables.

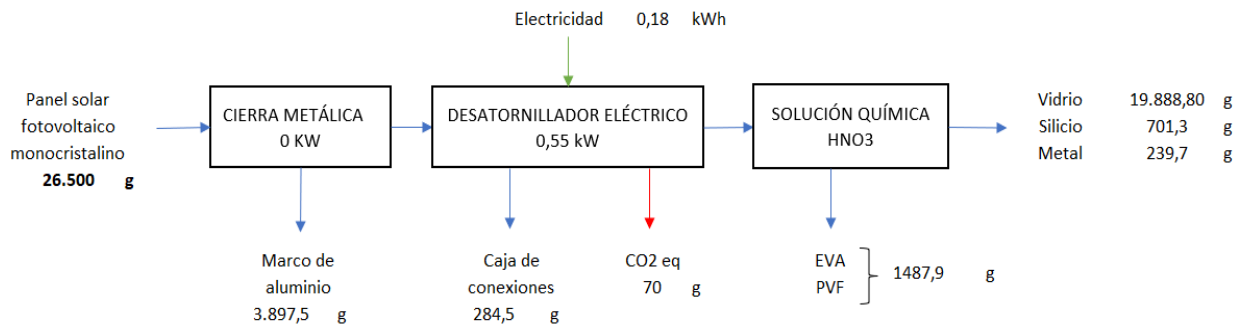


Figura 5.6: Diagrama para el reciclaje químico de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos. Elaboración propia.

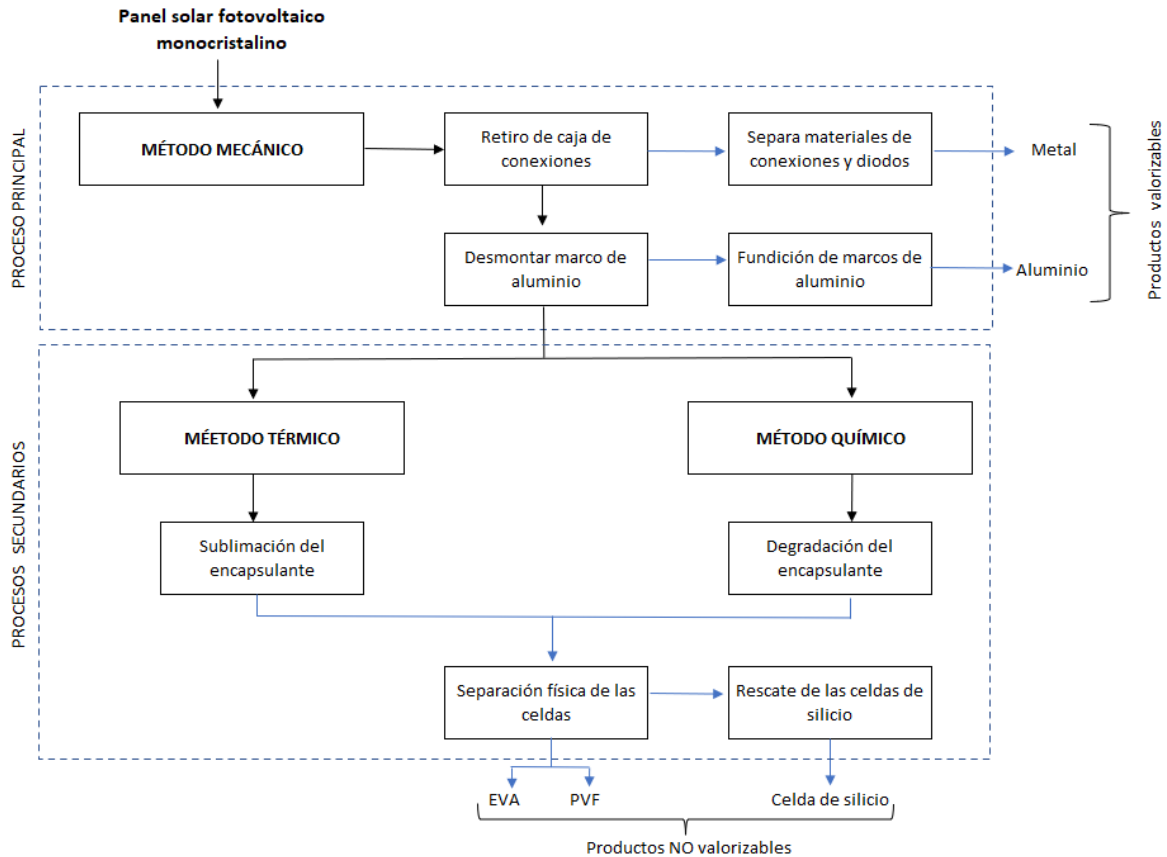


Figura 5.7: Proceso general de los métodos de reciclaje. Elaboración propia.

De acuerdo con la metodología señalada para este objetivo, se evaluaron los criterios de nivel de información, complejidad del proceso, si es necesario otro proceso, la cantidad de material no valorizable, la probabilidad de dañar los otros componentes aplicando el método y el tiempo de empleo para cada método de reciclaje, es decir, mecánico, térmico y químico. Se sintetiza la evaluación en la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Evaluación de los criterios para los distintos métodos de reciclaje. Elaboración propia.

Criterio	Método		
	Mecánico	Térmico	Químico
Nivel de información	Alto	Alto	Bajo
Complejidad del Proceso	Bajo	Medio	Medio
Necesario otro proceso	No	Sí	Sí
Cantidad de material no valorizable	84.22%	84.22%	84.22%
Probabilidad de daño a los componentes	No	Sí	Sí
Tiempo	Medio	Alto	Alto

Aplicando la *Ecuación 4.1* se obtienen las siguientes puntuaciones:

- Método mecánico:

$$VMR = 3 + 3 + 3 + 3 + 2$$

$$VMR = 14$$

- Método térmico:

$$VMR = 3 + 2 + 1 + 1 + 1$$

$$VMR = 8$$

- Método químico:

$$VMR = 3 + 2 + 1 + 1 + 1$$

$$VMR = 8$$

Por ende, se escoge el método mecánico como el más adecuado para llevar a cabo en comparación con el método térmico y el método químico.

#### 5.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 4: ELABORAR UN PLAN DE MANEJO PARA LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

➤ *Paso 1: Realizar una evaluación inicial del proyecto fotovoltaico*

Partiendo por un caso hipotético, el proyecto fotovoltaico es evaluado inicialmente bajo el peor escenario, obteniendo las siguientes ponderaciones que se presentan en la tabla 5.6:

**Tabla 5.6:** *Cálculo de la ponderación total del caso hipotético. Elaboración propia.*

A	T	R	G	E	M	Total	Evaluación
3	3	3	3	3	3	18	Mala

Al obtener una evaluación mala, se precisan las falencias del proyecto las cuales se exponen en la tabla 5.7. En el siguiente paso se plantea que hacer en los casos más desfavorables, para que logre cumplir con una evaluación excelente.

**Tabla 5.7:** *Falencias halladas en el proyecto fotovoltaico hipotético. Elaboración propia.*

Criterio	Falencias
Almacenamiento (A)	No existe un lugar específico para el acopio de paneles solares en desuso.
Transporte (T)	No existen responsables específicos para el manejo de los paneles solares degradados. No se cuenta con capacitaciones para un correcto manejo de los residuos sólidos derivados de los paneles solares en desuso, ni tampoco se entrega equipo de protección personal a los trabajadores.
Registro (R)	No se registra la cantidad en peso y/o volumen de los paneles solares considerados residuo, ni la fecha de ingreso.
Gestión (G)	Se deriva la gestión de los paneles solares en desuso a la empresa fabricante extranjera.
Empresa (E)	La empresa que se considera para la gestión de paneles solares en desuso está lejos del proyecto.

➤ *Paso 2: Definir las acciones y/o actividades correctivas por criterio.*

En primera instancia se debe demostrar ante la autoridad sanitaria, conforme a lo establecido en el artículo 19 del DS 148/04 que los paneles solares no son residuos peligrosos, puesto que, algunos de sus componentes son parte de la lista B “no peligrosos” del artículo 90 de la misma ley, esto mediante la realización de un estudio de toxicidad y peligrosidad en laboratorios certificados.

- **Acciones correctivas para el almacenamiento**

El área de acopio temporal de los residuos sólidos es al interior de un patio de salvataje, este lugar es alejado de los trabajadores. Las características que debe tener este sector como mínimo son:

- Suelo de gravilla.
- Un cierre perimetral de al menos 1,8 metros de altura.

- Un portón de acceso restringido, ingresando solo personal responsable de su operación.
- Contar con techumbre y protección contra condiciones ambientales, tales como, humedad, temperatura y radiación solar; mediante una estructura diseñada con materiales resistentes.
- Estar ordenado y no obstruir las vías de ingreso.
- Tener señalización de seguridad y uso de Elementos de Protección Personal (EPP).

La dimensión de este sitio debe considerar un gran flujo de paneles con fallas, antes de que se cierre la planta fotovoltaica, considerando como mínimo un área de 60 m<sup>2</sup>.

Luego, es necesario idear una ruta desde la generación del residuo hasta su almacenaje, indicando mediante señaléticas con flechas la dirección que deben tomar el personal, de esta forma evitar confusiones. Se propone poner letreros que señalen lo siguiente: “Ruta transporte residuos sólidos de paneles solares”, “Almacenamiento temporal de residuos sólidos de paneles solares” y “Ingreso solo personal autorizado”. En cuanto al uso obligatorio de los EPP, la empresa deberá tener carteles visibles en la zona donde se emplaza el proyecto. Los carteles deben estar siempre visibles, en caso de estar estropeados deberán ser cambiados por uno nuevo.

De acuerdo con la norma IRAM 10005/2008 de “Colores y señales de seguridad” se generan las pautas del diseño de los letreros. Las señales informativas deben ser rectangulares, con fondo verde (color debe cubrir como mínimo el 50% del área de la señal) y el símbolo de seguridad de color blanco. La forma de las señales de obligatoriedad es de fondo azul y el símbolo debe estar ubicado el centro de color blanco. Para las señales de prohibición estas deben ser de fondo blanco, su forma es con una corona circular y una barra transversal roja, y el símbolo de seguridad debe ser negro, ubicado en el centro que no esté sobrepuesto a la barra transversal.



Figura 5.8: Proposición de señales de prohibición y seguridad. Fuente: Google Imágenes.

Para facilitar el proceso de retiro y reciclaje se tendrán contenedores ordenados y clasificados o directamente sobre el suelo debidamente señalizado según el tipo de residuo, siguiendo los colores de reciclaje de la norma chilena NCh 3322/2013. Debido a que se trata un área exclusiva de paneles solares se dispondrán contenedores color gris para el metal como aluminio del marco del panel, en caso de que este se desprenda de la estructura, color verde en caso de haber vidrio suelto y color burdeo para los paneles solares. Cabe mencionar que, el acopio es temporal por un máximo de 6 meses.

Los contenedores deberán tener las siguientes características:

- Estar contruidos con materiales resistentes y tener un espesor adecuado.
- Tener un diseño predestinado a resistir los esfuerzos durante la manipulación, traslado, carga y descarga de los residuos sólidos.
- Estar rotulados, indicando el tipo de residuo y número de contenedor.



Figura 5.9: Colores de contenedores para distintos residuos. Fuente: Ecocontenedores, 2022.

- **Acciones correctivas para el transporte**

Una vez clasificado en desuso los paneles fotovoltaicos, por fallas regulares o tempranas, deberá desmontar el panel el personal operario, el cual con ayuda del supervisor subirán el panel al montacargas que luego se traslada desde el lugar de generación al área de acopio.

Los operarios que manipulen los paneles solares en desuso tomarán como medidas de seguridad utilizar elementos de protección personal como: casco, zapatos, lentes de seguridad y guantes de goma (acrilo nitrilo, PVC). Estos EPP son entregados por los supervisores, los cuales también complementariamente están encargados de impartir charlas informativas comunicando algunos de los siguientes tópicos:

- a) Fallas tempranas o regulares de los paneles solares.
- b) Rutas de traslado de paneles solares en desuso hacia el área de acopio temporal.
- c) EPP que deben utilizar para el manejo de los residuos sólidos derivados de los paneles solares.
- d) Distinción de los contenedores para los distintos residuos.
- e) Importancia de tener al día el libro de registro y fijación de etiquetas.

Las charlas se realizarán dos veces al mes, en caso de que no funcione o no se hagan las actividades correctamente se hará una capacitación urgente.

Las actividades y acciones que son clave para llevar a cabo el plan de manejo para los residuos sólidos precisan del perfil del profesional o técnico responsable de la ejecución del plan y del personal encargado de operarlo. En la tabla 5.8 se define el cargo, competencias y responsabilidades que tendrán los actores activos del plan.

**Tabla 5.8:** Competencias y responsabilidades de los distintos actores del plan de manejo de residuos sólidos. *Elaboración propia.*

<b>Cargo</b>	<b>Competencias</b>	<b>Responsabilidades</b>
Ingeniero Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conocimientos en gestión de Permisos Ambientales Sectoriales (PAS).</li> <li>- Conocimientos en el alcance del registro de emisiones y transferencia de contaminantes RETC.</li> <li>- Consideración de la legislación ambiental nacional vigente.</li> <li>-Concepto de mejoramiento continuo e innovación de Sistema de Gestión Ambiental (SGA)</li> <li>-Conocimiento en identificación y verificación de requisitos legales asociados al medio ambiente, salud y seguridad.</li> <li>- Estudios en gestión y manejo de residuos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ejecución del plan de manejo de residuos sólidos.</li> </ul>
Supervisor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conocimiento de Ley N° 16.744 y de la norma chilena NCh 3322/2013.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vigilar que el plan de manejo se lleve a cabo y que los procedimientos internos se ejecuten según lo estipulado en dicho plan.</li> <li>- Despachar y hacer las gestiones con el transportista y/o proveedor que llevará los residuos para el reciclaje.</li> </ul>

		- Realizar charlas de seguridad.
Personal operativo	- Conocimiento del plan de manejo interno de los residuos sólidos. Manejo de montacargas. - Contar con licencia de conducir vigente.	- Revisar el estado de los contenedores de residuos sólidos. - Traslado de los residuos desde el lugar de generación hacia el sitio de acopio destinado para los residuos sólidos de paneles solares. - Asistir a charlas informativas. - Escribir en el libro de registro la entrada y salida de residuos.

**- Acciones correctivas para el registro**

Al momento de ingresar al área de acopio temporal, se encontrará un libro de registro o acta que contenga una sección que plasme la fecha de ingreso y salida de los residuos, el tipo de residuo, la condición del residuo al momento de ingresar al área y de contar con la especificación la cantidad de peso y/o volumen, para llevar a cabo de mejor manera el registro, se propone tener una pesa industrial y una huincha de medir. De esta manera tener un respaldo para el caso que se deba presentar a la autoridad sanitaria una declaración en que conste la cantidad y calidad de los residuos industriales que genere, para dar cumplimiento al artículo 20 del D.S. 594.

**- Acciones correctivas para la gestión y empresa**

Se deberá hacer cargo el Ingeniero Ambiental en averiguar si en la actualidad ya existe la industria de reciclaje de paneles solares con método mecánico, de ser así, se evalúa si están debidamente inscritas y autorizadas para el transporte, tratamiento y disposición final por el Servicio de Salud conforme al artículo 19 del D.S. 594, para finalmente gestionar el retiro de los paneles por medio de esta empresa gestora cada 6 meses. Para este caso, se escogerá la empresa que se encuentre más cercana al proyecto.

De caso contrario, la empresa destinará a dos operarios para dismantelar parte del panel solar, aplicando el método mecánico para separar el marco de aluminio y su caja de conexiones. De esta última, se deben rescatar los metales de las conexiones y diodos. Una vez separado el metal y aluminio se colocan en distintos contenedores grises, claramente rotulados que faciliten el retiro de los materiales.

Para llevar a cabo la gestión de los metales, el Ingeniero Ambiental deberá ponerse en contacto con empresas inscritas para realizar el transporte, tratamiento y disposición final de los componentes seleccionados. Se escoge para el reciclaje a la empresa gestora que este más cercana al proyecto. De no ser posible su reciclaje, se enviarán a un sitio de disposición final autorizado por SEREMI de Salud.

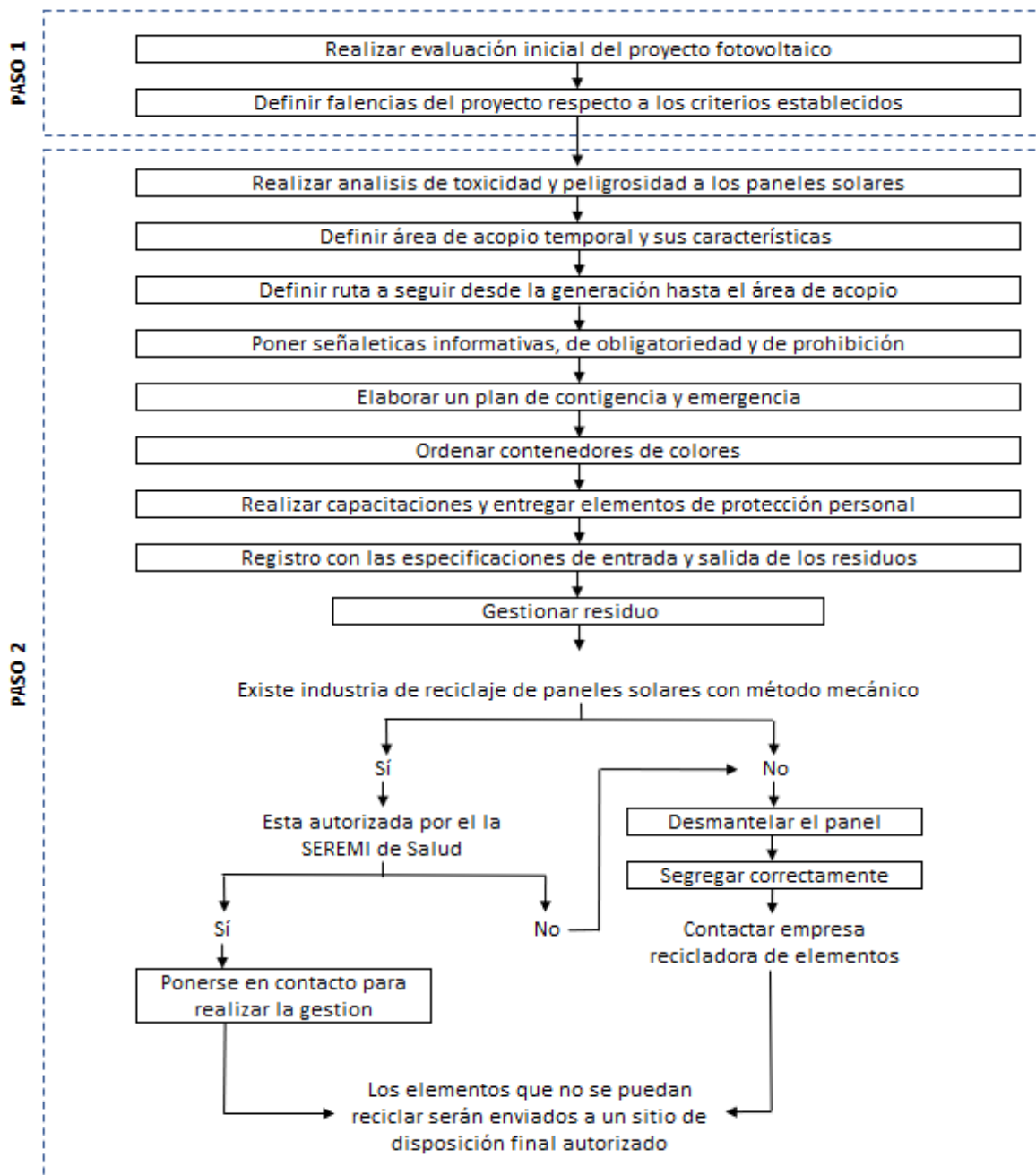


Figura 5.10: Esquema resumen de los pasos a seguir para el plan de manejo de los residuos sólidos derivados de paneles solares en desuso. Elaboración propia.

## 6 DISCUSIÓN

Según lo previsto los residuos sólidos generados a partir de los paneles solares en desuso de la industria fotovoltaica serán grandes cantidades en unos años más, pero no significa que los residuos no se generen por fallas tempranas en vez de las esperadas al finalizar su vida útil.

Se reconocen dos alternativas para manejar este residuo, derivar la responsabilidad al fabricante de los paneles solares o proceder al retiro del panel en desuso para disponer finalmente en un relleno sanitario autorizado por la Seremi de Salud. Según la recolección de datos el mayor porcentaje de los planes de manejo que son presentados al SEIA, escogen un relleno sanitario para la disposición final de los paneles solares, esto debido a que actualmente no existe una empresa destinada precisamente a la gestión de los paneles solares, solo se cuenta con la información de PV-CYCLE que opera en Europa y otras regiones que posee convenios con varios fabricantes de paneles solares. Se está regularizando la revalorización de estos residuos mediante la Ley 20.920, que fomenta el reciclaje, pero se debe tener en cuenta que la mejor opción es realizar esta actividad en alguna empresa nacional, debido a que trasladar los residuos conllevaría una mayor huella de carbono, disminuyendo el beneficio de revalorizar los componentes de este aparato. Sin embargo, la aplicación de esta ley al 2040, año en que se provee un alza significativa de paneles en desuso, “es probable que las metas para los RAEE ya hayan alcanzado tasas máximas o planas cercanas al 80%”, según lo planteado en el tercer informe de ReChile [22].

En relación con los proyectos fotovoltaicos con RCA aprobada, no todos informan la cantidad de módulos que se instalaran, ni el tipo de tecnología de los módulos fotovoltaicos que suministrará la potencia. Por lo tanto, que se tenga como resultado que se utilicen en mayor cantidad módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino, es considerado no representativo para toda la población de estudio, además el resultado obtenido se contrasta con la información mencionada en el Informe 1 de ReChile [20] “...en el mercado chileno y mundial predominan los módulos fotovoltaicos basados en silicio. Asimismo, dentro de este grupo los predominantes son los del tipo policristalinos.”.

Los porcentajes estimados de los componentes de un panel solar fotovoltaico monocristalino fueron de acuerdo con un estudio previo realizado por Herrarte concuerdan con los datos entregados por los trabajos de investigación de IRENA and IEA-PVPS en el año 2016 [27] y Sierra et. al. en el año 2020 [8].

Es necesario discutir respecto a la metodología que se empleó en este estudio para llevar a cabo en el tercer objetivo. El contacto con las empresas que revalorizan los componentes de un panel solar no

tuvo resultados debido a que no se respondieron los mensajes enviados por su plataforma y/o a su correo electrónico de contacto, tampoco se respondieron las llamadas telefónicas que se realizaron, implicando un menor detalle de los métodos que son utilizados en sus instalaciones y el uso final que les dan a los elementos. Lo anterior influye en los resultados del trabajo, debido a que la información proporcionada no detalla claramente el detalle de la recepción, tratamiento y disposición que se le da al panel solar como residuo.

Dentro de las publicaciones existentes que integran detalles de métodos para el reciclaje de paneles solares, sólo un estudio (Herrarte, 2020) efectúa el método mecánico y térmico detallando parte de su procedimiento. El resto de las publicaciones no son específicas, sino que hacen un análisis general. Durante la investigación se da a conocer que los métodos de reciclaje no son independientes, sino que inicia el proceso con el método mecánico, luego se puede implementar el método térmico o químico para eliminar el encapsulante. El resultado de implementar un segundo método al proceso de reciclaje no conlleva a revalorizar más material en el mercado nacional, puesto que, al eliminar el encapsulante no significa que el vidrio (que es el otro elemento que se recicla en el país) quede separado de los demás elementos que componen la celda solar. Por lo tanto, la tasa de recuperación valorizable es la misma si se implementa solo el método mecánico y al realizar la comparación, este es el método más conveniente.

Para la elaboración del plan de manejo de los residuos sólidos derivados de los paneles solares en desuso de las plantas generadoras de energía mediante la tecnología fotovoltaica, se acoge la opción de construir el plan mediante actividades y/o acciones correctivas que permitan mejorar el sistema actual de un proyecto en ejecución, de manera que, estos puedan lograr en su debido momento una mejora continua en la manera de disponer los aparatos que más se utilizan en su proyecto.

Se decide implementar dentro del plan el desmantelamiento de este aparato dentro de la misma instalación de un proyecto fotovoltaico, de esta manera, reciclar al menos el 15% del total del peso del panel solar. Puesto que, comparando los distintos métodos de reciclaje se concluye que conviene implementar sólo el método mecánico, debido a que, sólo se valoriza a nivel nacional el vidrio y los metales, pero, el vidrio que es obtenido después de aplicar los métodos térmico o químico no cumplen con las características para ser reciclado por las empresas que se dedican a esto, por lo tanto, se reciclaría el marco de aluminio y la caja de conexiones. Cabe destacar que, es de gran utilidad tener claras las responsabilidades que tiene cada actor en el plan de manejo, de manera que no existan confusiones al momento de llevar a cabo.

## 7 CONCLUSIÓN

A la fecha julio de 2022 existen 53 proyectos de plantas fotovoltaicas que se encuentran en operación en la región de Valparaíso. Considerando los años previstos de estos proyectos se proyecta que para el año 2040 la cantidad de paneles solares en desuso serán relevantes para la industria, sin embargo, previo a la finalización del plazo de operación de las plantas fotovoltaicas se prevé fallas tempranas.

Una vez que los paneles solares son clasificados como un residuo las empresas consideran dos formas para gestionar, la más común es derivar el material a rellenos sanitarios autorizados por la secretaria regional ministerial de salud. La otra opción que se implementa es el programa de reciclado, cuyo procedimiento está a cargo de la empresa fabricante, también, en algunos casos los módulos fotovoltaicos están certificados por la empresa PV-CYCLE la cual se encarga de reciclar la mayor parte de los componentes.

El panel solar más utilizado por la industria es el modelo monocristalino de silicio, el cual está compuesto de vidrio, aluminio, encapsulante, silicio, metales y una caja de conexión. Se reconoce que las empresas valorizadoras del mercado nacional podrían darle un nuevo uso al vidrio, aluminio, metales y a la caja de conexión.

Al comparar los distintos métodos de reciclaje se escoge el método mecánico para reciclar el panel solar, ya que, de esta forma se separan los componentes valorizables en el mercado de una manera más sencilla. Además, en la comparación los métodos térmico y químico separan el encapsulante del vidrio, pero este último componente no queda en condiciones para ser reciclado por las empresas valorizadoras, debido a que queda acoplado a la celda de silicio, por lo tanto, la eliminación del encapsulante no aumenta los porcentajes de reciclaje.

Elaborar un plan de manejo para los paneles solares en desuso requirió de establecer las falencias que puede tener el proyecto fotovoltaico para el proceso de gestión de este residuo, en base a esto, se determinaron cuáles son las actividades y/o acciones correctivas que permitieron establecer las responsabilidades de cada actor involucrado en el desarrollo del plan.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

[1] Aponte-Mayor, G., *et. al.* (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81 (184),158-163. [fecha de Consulta 9 de junio de 2022]. ISSN: 0012-7353. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49630405022>

[2] Energía para un futuro (2012). Estrategia nacional de energía 2012-2030. Recuperado de: [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/10/3\\_Estrategia-Nacional-de-Energia-2012-2030\\_Energia-para-el-Futuro.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/10/3_Estrategia-Nacional-de-Energia-2012-2030_Energia-para-el-Futuro.pdf)

[3] Roldan J. (2013). Energías renovables, lo que hay que saber. Ediciones Paraninfo. Recuperado de: [https://books.google.cl/books?id=yKh2AgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=energia+solar+en+chile&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cl/books?id=yKh2AgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=energia+solar+en+chile&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[4] Bonilla N. (2016). Análisis del ciclo de vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica, Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico De Costa Rica. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/61001739.pdf>

[5] Chaparro J., (2019). Manejo integral de residuos generados por los paneles solares fotovoltaicos en Colombia, Trabajo de grado para optar a Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/32081>

[6] Romero J., (2019). Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos, memoria para optar al título de Ingeniero civil mecánico. Universidad de Chile. Recuperado de [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174091/cf-romero\\_jc.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174091/cf-romero_jc.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[7] Sandoval, V. (2019). Proyecto de evaluación técnico y económica de la implementación de un proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos en desuso o falla. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/49708/3560902038980UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[8] Sierra M. M., Vásquez C. L. y Ramírez-Pisco R. (2020). Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 14(4), p 74-90. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7998811.pdf>

[9] González J, (2009). *Energías Renovables*. Reverté. Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E\\_9t1kC&oi=fnd&pg=PA4&dq=energ%C3%ADas+renovables+&ots=r9kwgdZfLd&sig=ptlQuutwJ4elzMA56Y9ZGU-ojv4#v=onepage&q=energ%C3%ADas%20renovables&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bl6L8E_9t1kC&oi=fnd&pg=PA4&dq=energ%C3%ADas+renovables+&ots=r9kwgdZfLd&sig=ptlQuutwJ4elzMA56Y9ZGU-ojv4#v=onepage&q=energ%C3%ADas%20renovables&f=false)

[10] Muñoz M., *et. al.* (2011). Early degradation of silicon pv modules and guaranty conditions. *Solar energy*, 85(9):2264–2274

[11] Bauer J., *et. al.* (2009). Hot spots in multicrystalline silicon solar cells: avalanche breakdown due to etch pits. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 3(2-3):40–42.

[12] Oreski G. & Wallner G. (2009). Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions. *Solar Energy*, 83(7):1040– 1047.

[13] Salazar, R. (2017). Desarrollo de herramienta para la eliminación de asimetrías de información en el mercado fotovoltaico chileno de autoabastecimiento.

[14] Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile, Recuperado de: [https://www.ine.cl/docs/default-source/proyecciones-de-poblacion/publicaciones-y-anuarios/base-2017/ine\\_estimaciones-y-proyecciones-de-poblaci%C3%B3n-1992-2050\\_base-2017\\_s%C3%ADntesis.pdf?sfvrsn=c623983e\\_6](https://www.ine.cl/docs/default-source/proyecciones-de-poblacion/publicaciones-y-anuarios/base-2017/ine_estimaciones-y-proyecciones-de-poblaci%C3%B3n-1992-2050_base-2017_s%C3%ADntesis.pdf?sfvrsn=c623983e_6)

[15] Natura Energy. Panel fotovoltaico. Recuperado de: <https://www.naturaenergy.cl/collection/panel-solar-fotovoltaico-24v>.

[16] Solartex Chile Spa. Panel Solar 370 Watts Ulica Solar Monoperc. Recuperado de: <https://www.solartex.cl/tienda/producto/panel-solar-370-watts-ulica-solar-monoperc/>.

[17] Bernal, W., et al. (2022). Guía para la disposición de paneles solares al final de su ciclo de vida en Colombia. Proyecto integral de grado para optar el título de especialista en gerencia de proyectos.

Fundación Universidad de América. Recuperado de:  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8894/1/27427463-2022-I-GP.pdf>.

[18] Herrarte, R. (2020). Gestión integral de desechos de paneles fotovoltaicos de silicio. Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/14783/>.

[19] Guzmán, C. (2017). Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados. Fundación Universidad de América. Recuperado de: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7038/1/632575-2017-II-GA.pdf>.

[20] In-Data- Rink, (2020). Informe 1: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil. Recuperado de: <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/1-Informe-1.pdf>.

[21] In-Data- Rink, (2020). Informe 2: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil. Recuperado de: <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/2-Informe-2.pdf>.

[22] In-Data- Rink, (2020). Informe 3: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil. Recuperado de: <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/3-Informe-3.pdf>

[23] Ramírez & Vargas, (2017). Diseño de una máquina que permita la separación del marco de aluminio de paneles solares monocristalinos de 60-72 celdas que han cumplido su vida útil para la fundación Circular Crops en Bogotá. Fundación Universidad de las Américas. Recuperado de: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3610501>.

[24] Muñoz, (2021). Diseño de planta de ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/19530>.

[25] Silveira, P., *et. al.* (2021). Photovoltaic module recycling: thermal treatment to degrade polymers and concentrate valuable metals. Detritus. Recuperado de: [43c84185881d469a8000b77d06e374c9efdc.pdf](https://arxiv.org/abs/2108.04441v1) (semanticscholar.org).

[26] The Opportunities of Solar Panel Recycling. Green Match. Recuperado de: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>.

[27] End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. (2016). IEA. Recuperado de: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End\\_of\\_Life\\_Management\\_of\\_Photovoltaic\\_Panels\\_Trends\\_in\\_PV\\_Module\\_Recycling\\_Technologies\\_by\\_task\\_12.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf)

[28] Catálogo de empresas de valorización de residuos Región Metropolitana de Santiago. Recicla Santiago. Recuperado de: [https://santiagorecicla.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/09/Catalogo-Valorizacion\\_sept2022.pdf](https://santiagorecicla.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/09/Catalogo-Valorizacion_sept2022.pdf).

[29] Instrucciones para la Señalización de Seguridad y Salud de Edificios. (2018). Oficina de Asesoramiento Técnico e Información de Prevención de Riesgos Laborales de CEME-CEOE. Recuperado de: <https://cemelilla.org/wp-content/uploads/2019/12/Instrucciones-para-la-Se%C3%B1alizaci%C3%B3n-de-Seguridad-y-Salud-de-Edificios.pdf>.

[30] Rubí, A. (2019). Actualización del plan de manejo de residuos peligrosos para la empresa Ball Chile S.A. Lampa, Santiago. Universidad de Valparaíso.

# ANEXOS

## Anexo 1. Ficha técnica del panel solar.

www.jinkosolar.com

**Jinko Solar**  
Building Your Trust in Solar

### Eagle PERC 72

## 340-360 Watt

MONO CRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

ISO9001:2008 · ISO14001:2004 · OHSAS18001 certified factory.  
IEC61215 · IEC61730 certified products.









**PERC**

(5BB)



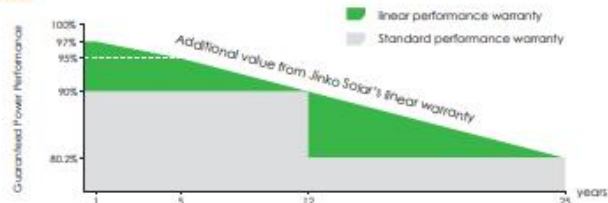


### KEY FEATURES

- 
**5 Busbar Solar Cell:**  
5 busbar cell design improves module efficiency and offers better aesthetic appearance for rooftop installation.
- 
**High Efficiency:**  
Higher module conversion efficiency (up to 18.55%) benefit from Passivated Emitter Rear Contact (PERC) technology.
- 
**PID RESISTANT:**  
Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.
- 
**Low-light Performance:**  
Advanced glass and cell surface texture design ensure excellent performance in low-light environment.
- 
**Severe Weather Resilience:**  
Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).
- 
**Durability against extreme environmental conditions:**  
High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.

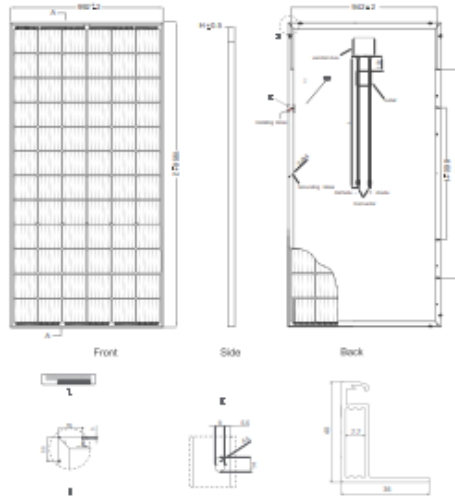
### LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



## Continuación del Anexo 1.

### Engineering Drawings

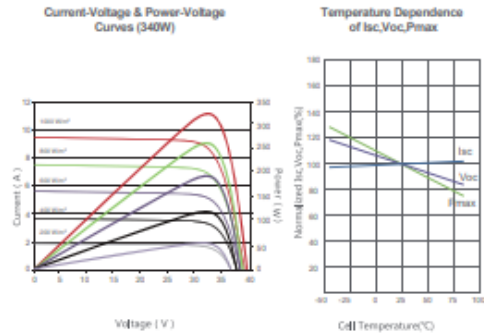


### Packaging Configuration

( Two pallets =One stack )

26pcs/pallet , 52pcs/stack, 624 pcs/40'HQ Container

### Electrical Performance & Temperature Dependence



### Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono-crystalline PERC 156x156mm (6 inch)
No. of cells	72 (6x12)
Dimensions	1956x992x40mm (77.01x39.05x1.57 inch)
Weight	26.5 kg (58.4 lbs)
Front Glass	4.0mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1x4.0mm <sup>2</sup> , Length:900mm or Customized Length

### SPECIFICATIONS

Module Type	JKM340M-72		JKM345M-72		JKM350M-72		JKM355M-72		JKM360M-72	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	340Wp	254Wp	345Wp	258Wp	350Wp	262Wp	355Wp	266Wp	360Wp	270Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	38.7V	36.8V	38.9V	37.0V	39.1V	37.2V	39.3V	37.5V	39.5V	37.7V
Maximum Power Current (Imp)	8.79A	6.89A	8.87A	6.98A	8.94A	7.05A	9.04A	7.09A	9.12A	7.17A
Open-circuit Voltage (Voc)	47.1V	45.5V	47.3V	45.8V	47.5V	46.0V	47.8V	46.2V	48.0V	46.5V
Short-circuit Current (Isc)	9.24A	7.33A	9.31A	7.38A	9.38A	7.46A	9.45A	7.54A	9.51A	7.61A
Module Efficiency STC (%)	17.52%		17.78%		18.04%		18.30%		18.55%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	15A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.39%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: ☀ Irradiance 1000W/m<sup>2</sup> 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m<sup>2</sup> 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌬 Wind Speed 1m/s

\* Power measurement tolerance: ± 3%

The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. EN-JKM-360M-72-PERC\_rev2016

Fuente: Jinko Solar (2018). Egel PERC 72 340-360 Watt.