



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE RECICLAJE DE PANELES SOLARES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FELIPE ANDRÉS BAEZ ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:

Patricio Jorquera Encina

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Leonel Núñez Lazo

Williams Calderón Muñoz

SANTIAGO DE CHILE

2023

INGENIERÍA DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE RECICLAJE DE PANELES SOLARES

En los últimos años la energía fotovoltaica ha tomado gran protagonismo a nivel nacional, llegando a constituir alrededor de un 20 % de la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica y con proyecciones de que continúe tomando aún más importancia durante los próximos años. Bajo este escenario y considerando que los paneles fotovoltaicos cuentan con una vida útil de entre 25 a 30 años, es que se espera que durante los próximos años se genere un gran flujo de paneles dados de baja que eventualmente se podrían convertir en desechos.

Por esta razón en este trabajo se explora la viabilidad técnica y económica de una planta de reciclaje de módulos fotovoltaicos. Para ello se comienza por realizar una revisión actual de los paneles instalados en Chile, concluyendo que hay más de 21 millones de paneles distribuidos entre las tecnologías de silicio policristalino (39,0%), silicio monocristalino (27,3%), monocristalino bifacial (24,8%) y capa fina de cadmio telurio (8,9%). Además, se revisan dos escenarios, uno conservador que plantea que el desmontaje de módulos podría ocurrir a partir de 2036 y otro que propone que esto podría suceder tan pronto como en 2030.

Posteriormente se estudian diversos procesos y maquinarias de reciclaje, algunos de los cuales han sido analizados en trabajos de investigación y otros que han sido desarrollados por empresas especializadas en el reciclaje y/o desarrollo de equipos. En base a esta revisión se seleccionan las líneas de reciclaje de NPC Incorporated y Suny Group, las que en conjunto permiten tratar paneles de silicio policristalinos y monocristalinos unifaciales, recuperando marcos de aluminio, cajas de conexión, láminas de vidrio, cobre, polvo de silicio y polímeros. Además, se opta por inspeccionar los paneles para evaluar la posibilidad de extender su vida útil mediante la reutilización.

Basándose en el escenario conservador, se calcula que habrá un promedio de casi 870.000 [módulos/año] de paneles unifaciales de silicio cristalino que se desmontarán y podrán convertirse en residuos. Utilizando esto, se decide que la planta dará abasto a cerca de un 35 % de este flujo, con lo que su diseño se realiza para alcanzar una producción de 315.000 [módulos reciclados/año]. Considerando que la planta deberá contar con espacios administrativos, la zona de reciclaje en si misma y una bodega para almacenar hasta un 25 % de la capacidad anual de la planta, se proyecta un layout que utiliza una superficie de 12.200 [m^2].

Para el emplazamiento, se realiza un proceso de optimización que da como resultado que una buena localización para ubicar el centro de reciclaje se encuentra en la región de Atacama.

Por último, se estima que el proyecto requerirá de una inversión inicial de \$6.557.095.227, con lo cual se realiza un flujo de caja considerando que un 7 % de los módulos tratados puedan ser reutilizados y vendidos en un mercado de segunda mano. Como resultado se deriva que bajo estas condiciones el proyecto es rentable con un VAN a los 15 años de \$975.759.468 y una TIR de 16,8%. Mediante un posterior análisis de sensibilidad se demuestra que el proyecto es muy sensible a bajas en la cantidad de paneles reciclados y/o reutilizados, sin embargo, esto puede ser mermado mediante el cobro de hasta \$1.500 pesos por panel reciclado.

*A mis hermanos y a mis padres,
por ser mi motivación.*

Gracias!

Agradecimientos

Quisiera ser capaz de agradecerle a todos aquellos que me han ayudado en este camino, ha sido una larga travesía y sin ustedes todo hubiese sido más difícil. Espero poderles transmitir mi gratitud mediante estas palabras.

Comenzaré por darle las gracias a mi familia, a mis abuelos, padres, hermanos, tíos y primos. No quiero dejar fuera a nadie. Gracias a todos por su cariño, por su apoyo incondicional, por sus consejos, por ayudarme a ser mejor persona y por los buenos momentos que hemos compartido. Me siento profundamente afortunado de que sean parte de mi vida, sin ustedes nada sería igual.

También agradecer a aquellos que por cosas del destino o simple casualidad aparecieron en mi vida para quedarse, a mis amigos. Gracias por sus buenos deseos, por su compañía, por su confianza y por permitirme crecer y lograr objetivos junto a ustedes.

Agradezco también a todos los profesores que en el transcurso de estos años me han transmitido su sabiduría más allá de lo académico y me han dotado de las herramientas necesarias para llegar hasta acá. En especial, muchas gracias a la profesora Estela, por haber creído en mi, por haberme dado consejos que cambiaron mi vida y por motivarme a seguir sueños que creía inalcanzables.

Por último, muchas gracias al profesor Patricio Jorquera, por permitirme tomar este tema para mi trabajo, por guiarme durante este proceso, por apoyarme con sus conocimientos y, en general, por toda la ayuda que me otorgó durante esta etapa. Igualmente, mi más profundo agradecimiento para los profesores miembros de la comisión, Leonel y Williams, por su apoyo, su comprensión y sus aportes para mejorar mi trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Alcances	3
2. Metodología	4
3. Antecedentes	5
3.1. La energía fotovoltaica y su relevancia en Chile	5
3.2. Paneles fotovoltaicos	7
3.2.1. Parámetros característicos	8
3.2.2. Efecto fotovoltaico y celdas solares	10
3.2.3. Tipos de paneles fotovoltaicos	12
3.3. Fin de la vida útil de paneles solares	14
3.4. Reciclaje, reutilización y reparación de paneles	16
3.4.1. Reciclaje	17
3.4.1.1. Delaminación mecánica	19
3.4.1.2. Delaminación térmica	19
3.4.1.3. Delaminación química	19
3.4.1.4. Métodos de separación	19
3.4.2. Reparación	21
3.4.3. Reutilización	22
3.4.4. Viabilidad económica del reciclaje	23
3.4.4.1. Ley 20.920	23
4. Parques fotovoltaicos en Chile	24
4.1. Parques fotovoltaicos	24
4.2. Situación de los parques solares Chilenos	25
5. Estimación de desechos	30
5.1. Escenario 1: Vida útil declarada	32
5.2. Escenario 2: 16 años	33
6. Revisión y selección de procesos	35
6.1. Trabajos de investigación	35
6.1.1. Song <i>et al.</i> , 2020	36
6.1.2. Pang <i>et al.</i> , 2021	37
6.1.3. Li <i>et al.</i> , 2022	38

6.2.	Empresas de reciclaje y reutilización de paneles	38
6.2.1.	First Solar	38
6.2.2.	Compton Industriale	40
6.2.3.	NPC Incorporated	41
6.2.4.	Suny Group	44
6.2.5.	Fabtech Enterprises	45
6.2.6.	SecondSol	46
6.3.	Selección de tecnologías y procesos	47
7.	Diseño del layout de la planta	49
7.1.	Capacidad de la planta	49
7.2.	Equipos e instalaciones	49
7.3.	Layout	51
8.	Ubicación de la planta	52
8.1.	Caso 1: Paneles cristalinos unifaciales	53
8.2.	Caso 2: Paneles cristalinos	54
9.	Evaluación económica	56
9.1.	Ingresos	56
9.2.	Inversión y costos	57
9.3.	Flujo de caja	61
9.4.	Análisis de sensibilidad	62
9.4.1.	Cobro por reciclaje	63
9.4.2.	Porcentaje reutilizados	64
9.4.3.	Producción de la planta	65
9.4.4.	Caso crítico	66
9.5.	Discusión de resultados	67
10.	Conclusiones	68
	Bibliografía	70
	Anexos	75
A.	Parques fotovoltaicos en Chile	75
B.	Ubicación de los parques en Chile	85
C.	Referencias evaluación económica	86
D.	Flujo de caja	87

Índice de Tablas

3.1.	Parques solares más importantes de Chile hasta agosto de 2022.	6
4.1.	Cantidad de parques, paneles y capacidad instalada por región.	29
4.2.	Tipos de paneles instalados por región.	29
5.1.	Distribución de materiales en paneles de cadmio telurio [27].	31
5.2.	Distribución de materiales en paneles cristalinos bifaciales [18].	31
5.3.	Distribución de materiales en paneles cristalinos unifaciales [12].	32
6.1.	Características técnicas de la línea de reciclaje Solar 4.0 [7].	41
6.2.	Características técnicas del separador semi automático [28].	42
6.3.	Características técnicas de la línea de reciclaje NPC [28].	43
6.4.	Características técnicas de la triturado y separadora de Suny Group [47].	45
8.1.	Coordenadas propuestas para cada región, caso 1.	54
8.2.	Coordenadas propuestas para cada región, caso 2.	55
9.1.	Ingresos por venta de materiales obtenidos a través del reciclaje.	56
9.2.	Ingresos por servicios de reciclaje y reutilización de paneles.	57
9.3.	Inversión necesaria para la compra de equipos.	57
9.4.	Costos por preparación del terreno e instalaciones.	58
9.5.	Costos mensuales por pago de sueldos al personal de la planta.	60
9.6.	Costos mensuales de operación de la planta.	61
9.7.	Indicadores económicos para distintos cobros por panel reciclado.	63
9.8.	Indicadores económicos para distintos porcentajes de reutilización.	64
9.9.	Indicadores económicos para distintos porcentajes de reutilización.	65
C.1.	Precios de venta de los materiales.	86
C.2.	Costos de la maquinaria.	86
C.3.	Referencias costos de operación de la planta.	86

Índice de Ilustraciones

3.1.	Capacidad instalada por tecnología y región a Agosto de 2022 [8].	6
3.2.	Componentes de un panel fotovoltaico [35].	7
3.3.	Curvas características de intensidad y potencia vs voltaje [31].	8
3.4.	Dopaje en redes cristalinas de silicio [43].	10
3.5.	Estructura básica de una celda fotovoltaica [42].	11
3.6.	Tipos de paneles solares.	12
3.7.	Panel solar bifacial [44].	13
3.8.	Ejemplos de curvas de desempeño o degradación.	14
3.9.	Modos de falla representativos en paneles de silicio [23].	16
3.10.	Distintos grados de recuperación de las celdas solares [43].	18
3.11.	Principales tecnologías para la separación de materiales [10].	21
4.1.	Secuencia del funcionamiento de un parque solar [38].	24
4.2.	Distribución de la vida útil declarada por los parques solares.	26
4.3.	Distribución de los tipos de paneles instalados.	26
4.4.	Instalación de tipo de tecnologías por año.	27
4.5.	Capacidad instalada por año y tecnología.	28
5.1.	Distribución másica por tecnología.	30
5.2.	Flujo de paneles desechados bajo el primer escenario.	32
5.3.	Materiales desechados por fin de vida útil de paneles.	33
5.4.	Flujo de paneles desechados bajo el segundo escenario.	34
5.5.	Materiales desechados por fin de vida útil de paneles.	34
6.1.	Principios y procesos de fragmentación por alto voltaje [45].	36
6.2.	Mecanismo de hinchamiento mejorado por microondas [29].	37
6.3.	Proceso de irradiación láser y pelado mecánico [25].	38
6.4.	Proceso de reciclaje de First Solar [15].	39
6.5.	Línea de reciclaje Solar 4.0 [7].	40
6.6.	Proceso de reciclaje de NPC Incorporated [28].	41
6.7.	Separador semi automático del marco y de la caja de conexión [28].	42
6.8.	Línea de reciclaje NPC [28].	43
6.9.	Método “Heated Blade” [28].	43
6.10.	Maquinaria de Suny Group [47].	44
6.11.	Trituradora y clasificadora de componentes de Suny Group [1].	44
6.12.	Diagrama de procesos seleccionados para la planta.	48
7.1.	Vehículos a utilizar para el transporte de módulos.	50
7.2.	Maquinaria de la planta de reciclaje.	50
7.3.	Layot propuesto para la planta de reciclaje.	51
8.1.	Punto de ubicación propuesto para la planta en el caso 1.	53
8.2.	Punto de ubicación propuesto para la planta en el caso 2.	54

9.1.	Flujo de caja acumulado del proyecto.	62
9.2.	Flujos de caja acumulado para diferentes cobros por panel reciclado.	63
9.3.	Flujo de caja acumulado para diferentes cantidades de paneles reutilizados. . .	64
9.4.	Flujo de caja acumulado para distintos porcentajes de paneles tratados.	65
9.5.	Flujo acumulado para diferentes capacidades en el caso sin reutilización y con una tarifa de \$750.	66
A.1.	Código de colores utilizado para las fuentes de la información.	75
A.2.	Información de los parques solares ubicados en la región de Arica y Parinacota.	76
A.3.	Información de los parques solares ubicados en la región de Tarapacá.	76
A.4.	Información de los parques solares ubicados en la región de Antofagasta.	77
A.5.	Información de los parques solares ubicados en la región de Atacama.	78
A.6.	Información de los parques solares ubicados en la región de Coquimbo.	79
A.7.	Información de los parques solares ubicados en la región de Valparaíso.	80
A.8.	Información de los parques solares ubicados en la región Metropolitana.	81
A.9.	Información de los parques solares ubicados en la región de O'Higgins.	82
A.10.	Información de los parques solares ubicados en la región del Maule.	83
A.11.	Información de los parques solares ubicados en la región de Ñuble.	84
A.12.	Información de los parques solares ubicados en la región del Biobío.	84
B.1.	Código de colores utilizado para los parques en Google Earth.	85
B.2.	Imágenes satelitales de algunos parques fotovoltaicos chilenos.	85
D.1.	Flujo de caja de la planta de reciclaje.	87

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El hecho de que en el norte de nuestro país se perciban los más altos niveles de radiación solar del mundo, en conjunto con la creciente necesidad de combatir la emergencia climática a través de la disminución de las emisiones de CO_2 ; han propulsado en Chile el desarrollo de energías limpias, particularmente la fotovoltaica, como opción de reemplazo a las fuentes de energía convencionales que corresponden a los principales agentes de contaminación atmosférica en nuestro país.

De este modo, ya en el año 2012, en pleno corazón del desierto de Atacama, fue inaugurada por Codelco la primera planta solar industrial de nuestro país; desde entonces, esta tecnología ha tenido un aumento sostenido en cuanto a la importancia que representa para Chile; a tal punto de que en la actualidad constituye alrededor de un 20% de la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica; y se espera que, impulsado por la implementación de políticas públicas, continúe experimentando un alza sostenida durante los próximos años.

Sin embargo, más allá de los beneficios propios del uso de esta tecnología, como lo son la importante reducción de la huella de carbono generada; la implementación de esta fuente de energía renovable trae consigo dos grandes problemas: el primero de ellos posee relación con la gran cantidad de superficie, y por lo tanto de paneles solares, que se necesitan para la instalación de un parque solar que genere cantidades considerables de energía; el segundo, es el hecho de que los paneles solares poseen cierta vida útil y, por lo tanto, luego de determinado tiempo, estos se convierten en desechos.

Así, considerando el alza sostenida del uso e implementación de esta tecnología en conjunto con la gran cantidad de paneles solares que han sido y serán instalados y la futura obsolescencia de estos mismos; se han realizado estudios y proyecciones que estiman que en los próximos años comenzarán a aparecer los primeros paneles solares que han finalizado su vida útil y que entre 2027 y 2046 se generará un peak de alrededor de 4 millones de paneles solares obsoletos, que en este escenario, serán equivalentes a 120.000 toneladas de desechos [20].

Ante este panorama surge la necesidad de establecer estrategias, metodologías y preparar infraestructura que permita responder, en el corto, mediano y largo plazo, a la gran cantidad de residuos que serán generados por el fin de la vida útil de los paneles instalados.

Una vez que se considera la composición general de un panel fotovoltaico, se observa que la mayor parte de este corresponde a vidrio y aluminio; materiales que poseen gran capacidad para ser reciclados. Por ello, resulta como respuesta natural a la gran cantidad de desechos que se generarán a partir de paneles que acabarán con su vida útil, el establecer métodos que permitan el reciclaje de estos mismos.

Es así como en este trabajo se comienza por abordar los antecedentes generales sobre la energía solar en Chile y los módulos fotovoltaicos. En particular se realiza una revisión de la caracterización de los paneles solares, su principio de funcionamiento, su vida útil y las opciones de tratamiento para los módulos en el término de esta.

Posteriormente se realiza una revisión de los parques fotovoltaicos instalados en Chile, enfocándose en caracterizar cualidades como su potencia instalada, la cantidad y el tipo de módulos utilizados en sus instalaciones y su ubicación. En base a estos antecedentes se estudian dos diferentes escenarios para estimar cómo se desarrollará en los próximos años la generación de desechos debido al fin de vida útil de los paneles solares instalados en Chile.

En un siguiente capítulo se analizan y recapitulan diferentes trabajos de investigación de científicos y académicos y procesos o proyectos desarrollados por empresas para el tratamiento de módulos fotovoltaicos en el término de su vida útil. A partir de esta revisión se seleccionan aquellos procesos más aptos para ser implementados en una planta de reciclaje de paneles fotovoltaicos en Chile.

Con los procesos seleccionados, se determina la capacidad productiva de la planta para, posteriormente, precisar la infraestructura y los equipos necesarios en conjunto con un layout general con la disposición de estas instalaciones.

Para finalizar, se lleva a cabo una evaluación económica con tal de determinar la viabilidad de una planta de reciclaje de paneles fotovoltaicos con las características definidas. Junto con esto, se efectúa un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que posean mayor impacto en los resultados económicos.

1.2. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es desarrollar la ingeniería de prefactibilidad técnico y económica de una planta de reciclaje de paneles solares.

Objetivos específicos

- Evaluar la situación de los parques solares en Chile.
- Estimar la producción de desechos debido al fin de la vida útil de paneles solares.
- Estudiar las tecnologías de reciclaje de paneles solares y seleccionar la que más se adecúe al mercado Chileno.
- Establecer una zona geográfica para instalar la planta de reciclaje.
- Analizar tecno-económicamente el proyecto.

1.3. Alcances

Para el desarrollo de este trabajo se considerarán principalmente aquellos parques fotovoltaicos nacionales que cuenten con potencias instaladas iguales o mayores a 3 [MW] y que hayan sido construidos hasta Agosto de 2022.

Se definirán y seleccionarán las tecnologías y procesos de reciclaje para tratar al menos 2 de las tecnologías presentes en los paneles fotovoltaicos instalados en Chile.

Se establecerá el layout y se definirá la ubicación de las instalaciones requeridas para abarcar el reciclaje de al menos una de las tecnologías utilizadas en los paneles fotovoltaicos presentes en Chile.

Capítulo 2

Metodología

Para poder realizar este trabajo y alcanzar los objetivos que han sido planteados, se siguió una metodología compuesta por 7 etapas principales, las cuales se explican a continuación:

1. **Recopilar antecedentes:** En esta actividad inicial se realizó una revisión bibliográfica y una revisión del estado del arte del reciclaje y opciones de manejo de paneles fotovoltaicos en el fin de su vida útil.
2. **Evaluar la situación de los parques solares en Chile:** A través de distintas fuentes de información se estableció una base de datos con información sobre la potencia, vida útil, ubicación y año de entrada en operación de distintos parques fotovoltaicos instalados en Chile. Además, se recopilaron datos sobre la cantidad y tipo de módulos fotovoltaicos utilizados en estos parques.
3. **Estimar la generación de desechos:** En esta actividad se realizó una estimación del tipo y cantidad de desechos que serán generados por el fin de la vida útil de los paneles que se encuentran instalados en el país.
4. **Seleccionar tecnologías y procesos de reciclaje:** A partir de la revisión, el análisis y la comparación de diversos métodos de reciclaje, se seleccionaron aquellos métodos y tecnologías más adecuados para ser implementados en Chile.
5. **Establecer el layout de la planta:** Se estableció un layout con la ubicación espacial de las instalaciones y los principales equipos requeridos para llevar a cabo los procesos de la planta de reciclaje.
6. **Determinar una ubicación geográfica para la planta:** Considerando la cercanía a los diferentes parques solares, se seleccionó un desplazamiento geográfico en el que fuese posible la instalación de la planta de reciclaje.
7. **Realizar un análisis económico del proyecto:** Se generó un análisis de costos e ingresos para estimar, a través de indicadores económicos como el VAN y el TIR, la viabilidad económica del proyecto.

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. La energía fotovoltaica y su relevancia en Chile

La energía fotovoltaica es el proceso de transformación directa en el que, a través del uso de tecnologías basadas en el efecto fotovoltaico, la radiación solar es convertida en energía eléctrica a través de dispositivos conocidos como paneles solares o fotovoltaicos.

Esta tecnología principalmente es utilizada para la producción de electricidad a gran escala a través de amplias instalaciones, conocidas como parques fotovoltaicos, en las cuales se sitúan un gran número de placas solares interconectadas entre sí, permitiendo captar gran cantidad de radiación solar para transformarla en energía eléctrica. Sin embargo, más allá de grandes instalaciones, sus usos y adaptaciones también le permiten abarcar y ser útil en aplicaciones tales como el suministro de energía a recintos domiciliarios, dispositivos electrodomésticos, alumbrado público y vehículos entre otras.

La implementación de esta tecnología conlleva consigo grandes ventajas; una de estas corresponde al hecho de que la energía solar fotovoltaica no produce gases de efecto invernadero ni emite ningún tipo de sustancia tóxica o contaminante. Del mismo modo, a diferencia de las fuentes tradicionales de obtención de energía, sus reservas no son finitas, pues provienen directamente del sol; lo que le permite ser una fuente renovable y sostenible para la obtención de electricidad.

Todas estas ventajas, en conjunto con los compromisos internacionales y la implementación de políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, han impulsado fuertemente el uso y la instalación de esta energía renovable en nuestro país desde la instalación del primer parque solar fotovoltaico en el año 2012. Para agosto del presente año, alrededor de 6.842 [MW], correspondientes a un 21,1 % de la capacidad instalada en Chile que se encuentra conectada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), provienen de proyectos que utilizan la tecnología solar.

En la siguiente figura se muestra el detalle del aporte que realiza cada tecnología y región al SEN:

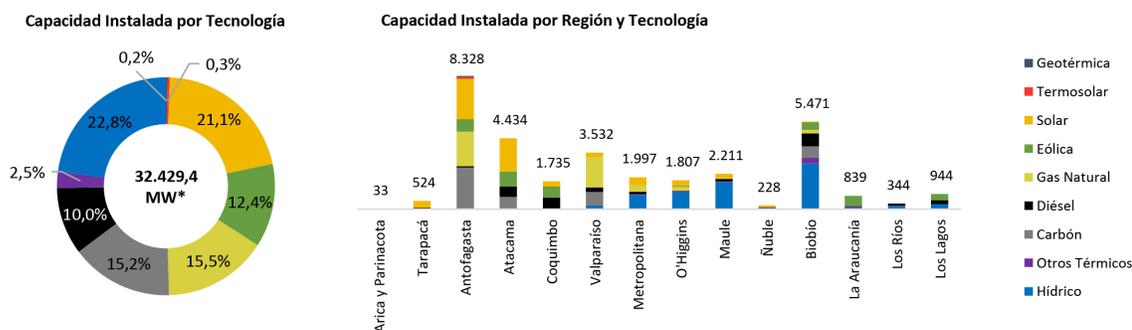


Figura 3.1: Capacidad instalada por tecnología y región a Agosto de 2022 [8].

De este modo, tal como muestra la figura, se puede apreciar que la energía solar constituye la segunda fuente de generación más importante en cuanto a capacidad instalada. Así mismo, la gráfica muestra que este tipo de tecnología tiene presencia desde la región de Arica y Parinacota hasta la región del Biobío, siendo ampliamente predominante en el norte de Chile, particularmente en las regiones de Antofagasta y Atacama.

En cuanto a los parques solares que se encuentran funcionando en Chile, la tabla que se encuentra a continuación muestra la información referente a la capacidad de los 10 complejos fotovoltaicos más importantes en cuanto a capacidad instalada:

Tabla 3.1: Parques solares más importantes de Chile hasta agosto de 2022.

Parque Solar	Capacidad [MW]
Campos del Sol Sur	382,0
Sol del Desierto	258,7
Malgarida I y II	204,3
Domeyko 2	204,0
El Romero Solar	196,0
Campos del Sol Centro	184,8
Campos del Sol Norte	184,8
Atacama Solar II	170,7
Santa Isabel	170,2
Sol de Lila	163,0

A excepción de “Atacama Solar II”, que se ubica en la región de Tarapacá, todos los parques fotovoltaicos que se nombran en la tabla se localizan entre las regiones de Atacama y Antofagasta.

3.2. Paneles fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos son los dispositivos utilizados para la conversión de radiación solar en energía eléctrica. Su composición general consiste en una estructura como la que se muestra en la siguiente figura:

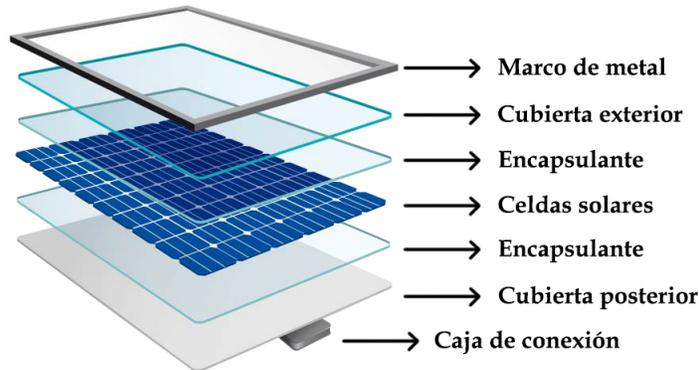


Figura 3.2: Componentes de un panel fotovoltaico [35].

De este modo los principales componentes y su aporte al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos son:

- **Marco de metal:** Generalmente de aluminio, aporta rigidez e impermeabilidad al panel. Permite además que los paneles puedan ser instalados en estructuras de soporte donde los módulos pueden ser colocados e interconectados entre sí.
- **Cubierta exterior:** Protege al panel de los efectos atmosféricos adversos al mismo tiempo que facilita la transmisión de luz hacia las celdas solares.
- **Encapsulante:** Polímero termoplástico, generalmente EVA (etil-vinil-acetileno), que forma una película selladora que permite aislar a las celdas fotovoltaicas del aire y la humedad exterior a la vez que proporciona una excelente transmisión de la radiación solar.
- **Celdas o células fotovoltaicas:** Son el elemento más importante del panel; constituidas principalmente por semiconductores, son las que convierten la energía incidente de la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico.
- **Cubierta posterior:** Protege la parte posterior de los paneles de los agentes atmosféricos. Compuesto por capas opacas que reflejan la luz que ha incidido sobre las celdas, permitiendo que vuelva a incidir en estas.
- **Caja de conexión:** Esta caja aloja las conexiones eléctricas del panel, las protege de las condiciones medioambientales y permite vincular paneles entre sí dando continuidad al circuito.

3.2.1. Parámetros característicos

Hay una serie de parámetros que sirven para caracterizar eléctricamente a un módulo fotovoltaico y que suelen ser medidos y entregados por los fabricantes bajo las llamadas condiciones estándar de laboratorio (STC): una temperatura de 25°C, una irradiancia recibida de 1.000 [W/m²] y una masa de aire de 1,5.

La mayoría de estos parámetros suelen ser representados o pueden ser obtenidos a partir de las llamadas curvas características del panel, las que corresponden a gráficos de intensidad de corriente y potencia en función del voltaje:

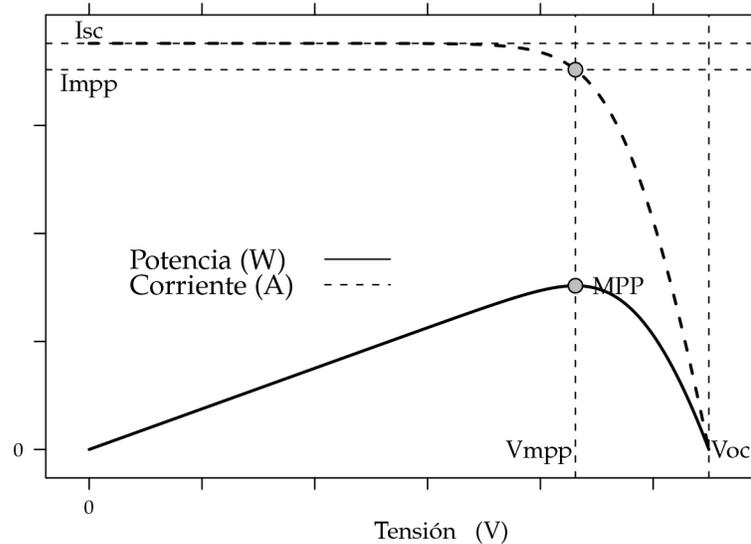


Figura 3.3: Curvas características de intensidad y potencia vs voltaje [31].

Los parámetros que pueden ser obtenidos a partir de estos gráficos, corresponden a:

- **Corriente de corto circuito, I_{sc} :** Es la intensidad de corriente, medida en amperios, que el panel puede generar estando en cortocircuito. Corresponde por tanto a la máxima intensidad que es capaz de producir el módulo. Puede ser medido directamente con el uso de un amperímetro.
- **Potencial de circuito abierto, V_{oc} :** Es la tensión máxima del panel, medida en voltios. Se puede medir directamente con un voltímetro si es que el panel no tiene ninguna carga conectada.
- **Potencia máxima, P_{mpp} :** Es la máxima potencia que puede ser suministrada por un panel bajo las condiciones estándar de medida. Puede calcularse como:

$$P_{mpp} = I_{mpp} \cdot V_{mpp} \quad (3.1)$$

En general, los paneles comerciales cuentan con potencias máximas de entre 300 a 500 [W].

- **Corriente en el punto de máxima potencia, I_{mpp} :** Es la corriente que produce el panel en el punto de máxima potencia.
- **Voltaje en el punto de máxima potencia, V_{mpp} :** Es la tensión que produce el panel en el punto de máxima potencia.
- **Factor de forma, FF :** Es la relación entre la potencia máxima y el producto entre I_{sc} y V_{oc} :

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.2)$$

Generalmente, este valor se encuentra entre 0,7 y 0,8. Valores bajos para el factor de forma están asociados con la existencia de pérdidas de eficiencia significativas en el módulo.

- **Eficiencia de conversión, η :** Habitualmente expresada como porcentaje, corresponde al cociente entre la potencia máxima de salida del panel y la potencia luminosa recibida (P_L). Puede ser calculada como:

$$\eta = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{P_L} = \frac{P_{mpp}}{P_L} \quad (3.3)$$

Este valor está determinado principalmente por tres factores, la eficiencia de las celdas fotovoltaicas que componen el panel, la configuración de estas celdas y el diseño del módulo.

En base a este parámetro se puede distinguir entre los paneles de eficiencia estándar, cuyas eficiencias se encuentran entre el 17% y el 18%, y los paneles de alta eficiencia, que poseen eficiencias de entre el 19% y el 23%.

3.2.2. Efecto fotovoltaico y celdas solares

El efecto fotovoltaico, descubierto en el año 1839 por el físico francés Alexander Bequerel, constituye el principio fundamental del funcionamiento de los paneles solares. El fenómeno se basa en la propiedad que poseen los semiconductores de mejorar su capacidad de conducción eléctrica al ser iluminados; de este modo, cuando la luz incide en la superficie de un semiconductor, este libera electrones que pueden ser utilizados para la generación de electricidad. No obstante, para la generación de corriente eléctrica, también se hace necesaria la presencia de un voltaje que permita direccionar los electrones liberados. Para conseguir esto, el método más sencillo consiste en unir dos semiconductores con características electrónicas diferentes. Es por esta razón que, en algunos casos, los semiconductores utilizados para la fabricación de celdas fotovoltaicas son modificados a través de un proceso conocido como dopaje en el cual se añaden impurezas a la red cristalina del semiconductor con el fin de cambiar sus propiedades eléctricas.

Así, por ejemplo, los átomos de fósforo y boro son utilizados ampliamente para dopar silicio. Al añadir un átomo de fósforo en una red cristalina de silicio, cuatro de los cinco electrones de valencia del fósforo formarán sin esfuerzo enlaces con los átomos de silicio vecinos, mientras que el electrón restante podrá ser liberado fácilmente; convirtiéndose esta red de silicio en un conductor negativo.

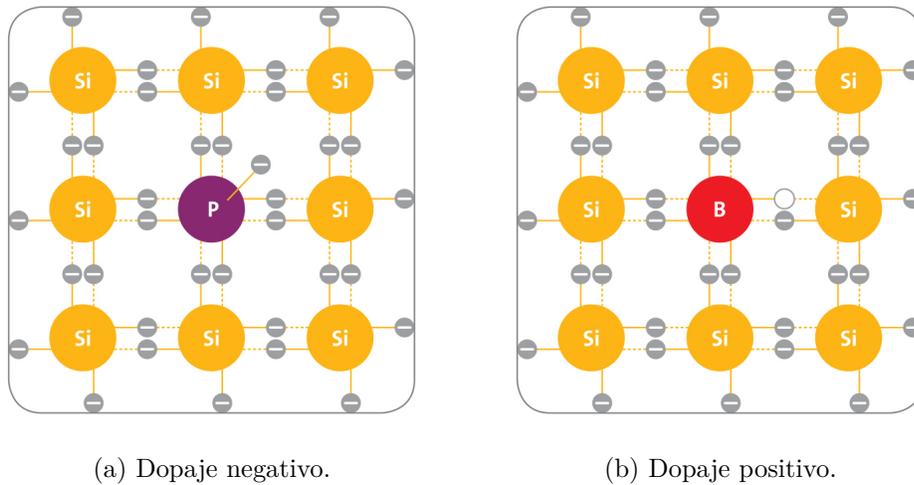


Figura 3.4: Dopaje en redes cristalinas de silicio [43].

Similarmente, si el dopaje se realiza con un átomo con tres electrones de valencia, como el boro, este no podrá formar enlaces con los cuatro átomos de silicio vecinos. Sin embargo, si será capaz de aceptar electrones de enlaces cercanos. Con esto, bajo condiciones ambientales, un electrón de un enlace Si-Si cercano se unirá al átomo de boro y le permitirá generar enlaces con los cuatro átomos de silicio vecinos, dejando con ello un “agujero” en la red y volviendo el semiconductor en un conductor positivo [40].

Es así, que este efecto es aprovechado por las celdas o células fotovoltaicas para la generación de energía eléctrica a través de un arreglo de componentes como el que se muestra en la siguiente figura:

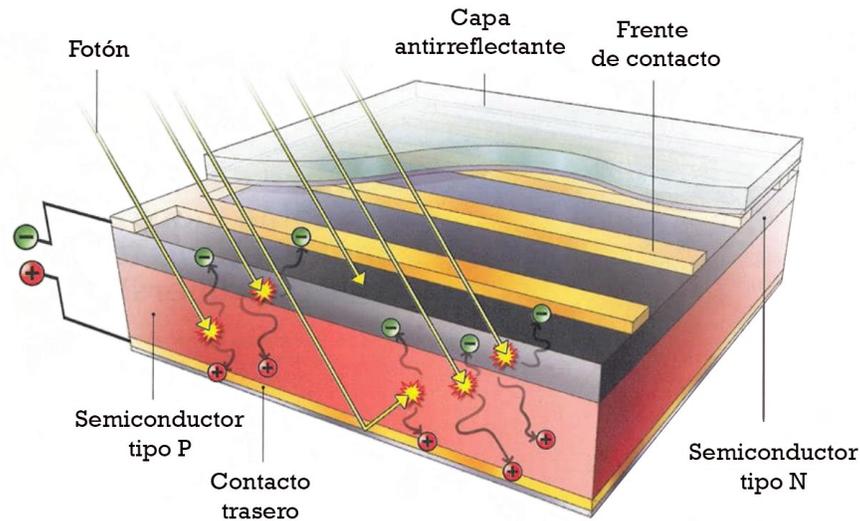


Figura 3.5: Estructura básica de una celda fotovoltaica [42].

Los elementos que componen a la célula son:

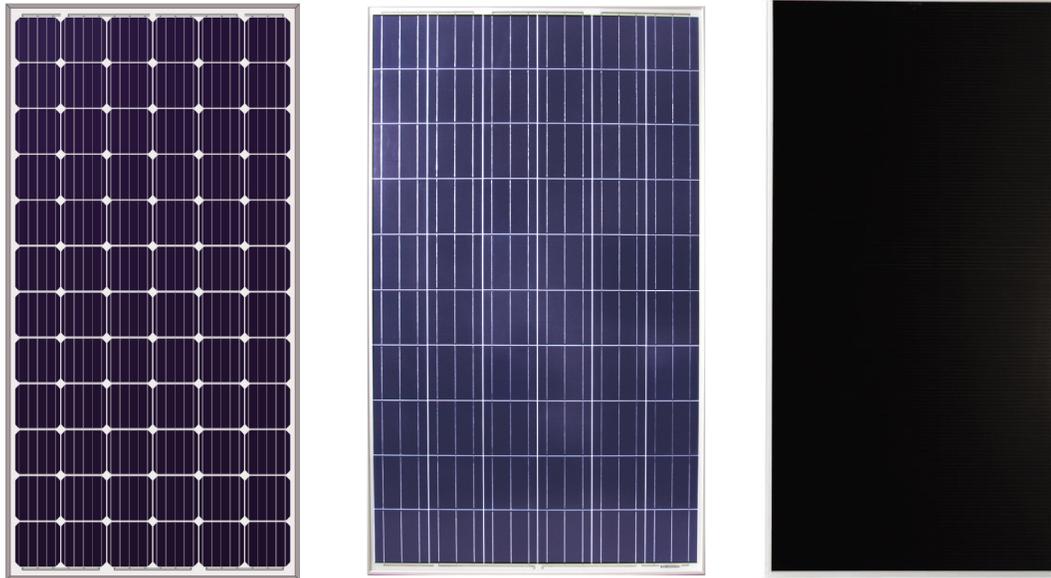
- **Capa antirreflectante:** Se trata de una delgada cubierta de material dieléctrico utilizada para reducir la reflexión de luz en la superficie del semiconductor tipo N. Permitiendo con esto minimizar pérdidas y aumentar la eficiencia de conversión de la celda. Está compuesta principalmente por óxido de silicio (SiO_2), nitruro de silicio (Si_3N_4) y alumina (Al_2O_3).
- **Semiconductores tipo P y N:** Corresponden a los semiconductores que han sido dopados de forma positiva y negativa respectivamente.
- **Frente de contacto:** Contacto metálico delgado, generalmente de plata, que capta y transfiere electrones entre celdas fotovoltaicas. Su forma de malla está diseñada para permitir la entrada de luz al semiconductor tipo N.
- **Contacto trasero:** Contacto metálico, usualmente de aluminio, que cubre completamente a la zona posterior para transferir electrones hacia el semiconductor tipo P.

Con esto, cuando un fotón penetra la celda activa electrones que son liberados en ambas capas de silicio. Parte de los electrones de la capa inferior se mueven hacia la parte superior de la celda donde fluyen como electricidad a través del frente de contacto para luego regresar a la celda por medio del contacto trasero, creando con ello un circuito cerrado.

En los paneles fotovoltaicos generalmente se utilizan conjuntos de 72 celdas unidas mediante una cinta de soldadura constituida esencialmente por un núcleo de cobre revestido con plomo y estaño.

3.2.3. Tipos de paneles fotovoltaicos

Si bien el funcionamiento de todas las células fotovoltaicas está basado en el mismo efecto; existen distintos tipos de celdas, las que se diferencian principalmente en el tipo de semiconductor utilizado para su fabricación. Así, según el tipo de semiconductor utilizado, los principales tipos de paneles existentes son:



(a) Monocristalino (Si) [26]. (b) Policristalino (Si) [34]. (c) Capa fina ($CdTe$) [14].

Figura 3.6: Tipos de paneles solares.

- **Monocristalinos:** Sus celdas están compuestas por un único gran cristal de silicio, el cual es fabricado en un proceso en que se controla el crecimiento de silicio de gran pureza de para asegurar de que no se creen otros cristales. Sus celdas se caracterizan por poseer colores entre negro y azul y bordes redondeados. Además, el proceso de fabricación de estos paneles es lento y requiere de elevados costos energéticos. En comparación con los paneles policristalinos poseen costos y eficiencias superiores.
- **Policristalinos:** El cristal de silicio presente en las celdas de estos paneles posee algunas impurezas generadas debido a que, para su fabricación, el metal fundido es depositado en moldes sin controlar la forma en que cristalizará; resultando esto en la formación de más de una estructura cristalina. Sus celdas, además de poseer forma rectangular, se caracterizan por tener una coloración entre verde y azul. En comparación con los monocristalinos, la fabricación de estos paneles es más rápida y económica. Sin embargo, resultan ser menos eficientes y pueden poseer vidas útiles más cortas.
- **De capa fina:** También conocidos como paneles de película delgada, sus celdas están hechas de finas capas de material semiconductor, las cuales se fabrican mediante el depósito de delgadas capas del material sobre un sustrato como el vidrio, el plástico o el metal. Suelen ser mucho más delgados que los módulos convencionales de silicio, lo que le permite a su vez ser menos pesados y más flexibles.

En comparación con los paneles cristalinos, son más baratos pero menos eficientes. A su vez, puede ser clasificados según el tipo de material utilizado para la fabricación de sus celdas; los más comunes son:

- **Silicio amorfo ($a - Si$):** Sus celdas están conformadas por silicio no cristalizado, por lo que cuentan con una organización atómica irregular. Suelen ser utilizados en aplicaciones que requieren de bajo consumo, tales como relojes, calculadoras y juguetes.
- **Cadmio telurio ($CdTe$):** Sus celdas se construyen por medio de capas en las que se intercala telurio de cadmio ($CdTe$) y sulfuro de cadmio (CdS). Si bien poseen eficiencias mayores que los módulos de silicio amorfo, cuentan con el inconveniente de que el cadmio es un metal altamente tóxico, por lo que debe ser tratado adecuadamente para evitar daños al ser humano y al medio ambiente.

Además de estos, otro tipo de paneles de capa fina son los paneles cobre, indio, galio y selenio ($CIGS$), los paneles de arseniuro de galio ($GaAs$) y los de sulfuro de cadmio (CdS) entre otros.

Asimismo, existe otro tipo de paneles que corresponde a los paneles bifaciales. Este tipo de módulos se caracterizan primordialmente por el hecho de que sus celdas, en vez de estar formadas por una unión entre un semiconductor tipo N y uno tipo P, cuentan con una unión N-P-N. Esto le permite absorber tanto la luz del sol que es proyectada en su parte frontal, como la luz que llegue a su parte posterior; lo que le permite aprovechar la iluminación que sea reflejada por la superficie que se ubique por debajo de él.

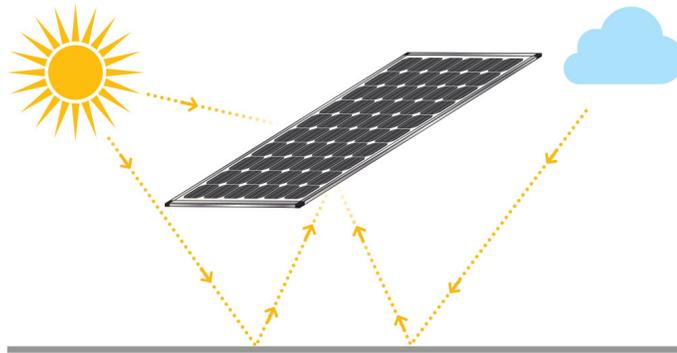


Figura 3.7: Panel solar bifacial [44].

También es por esta razón que la composición de los módulos bifaciales difiere un poco de la estructura general de los paneles mostrada en la figura (3.2) . En este caso, para que las celdas puedan utilizar su potencial, la cubierta posterior es fabricada de materiales transparentes, generalmente vidrio. Por lo mismo, este tipo de paneles suelen ser más costosos y pesados que los módulos unificiales; sin embargo, poseen mayores eficiencias.

A nivel global, en los últimos 20 años, las tecnologías basadas en silicio cristalino han representado alrededor de un 90% del total de las ventas de paneles fotovoltaicos. De igual modo, durante 2020 el 95% de los módulos fabricados correspondieron a módulos de silicio [52].

3.3. Fin de la vida útil de paneles solares

Determinar la vida útil de un módulo fotovoltaico es una tarea que resulta difícil, lo que se debe principalmente al hecho de que la masificación de la tecnología fotovoltaica es algo reciente y, por lo tanto, aún no se cuenta con la experiencia suficiente para concluir este asunto.

Algunas de las estimaciones para el cálculo de la vida útil de los módulos fotovoltaicos se basa en las garantías entregadas por los propios fabricantes de paneles. Usualmente, los fabricantes entregan dos tipos de garantías, una de ellas con una duración de entre 10 a 12 años para cubrir los desperfectos de fabricación que pueda sufrir el módulo, y otra garantía que asegura que la tasa de degradación o desempeño del rendimiento de los paneles no superará ciertos valores en un período dado de tiempo.

En su mayoría, los fabricantes incluyen curvas, en las fichas técnicas de sus paneles, en las que muestran como se garantiza que se desarrollará la tasa de degradación del módulo en los próximos años. Ante esto, es casi un estándar que para los paneles unifaciales se asegure que durante 25 años los módulos tendrán desempeños superiores al 80 %. Mientras que para los paneles bifaciales se garantiza el mismo desempeño para un período de 30 años.

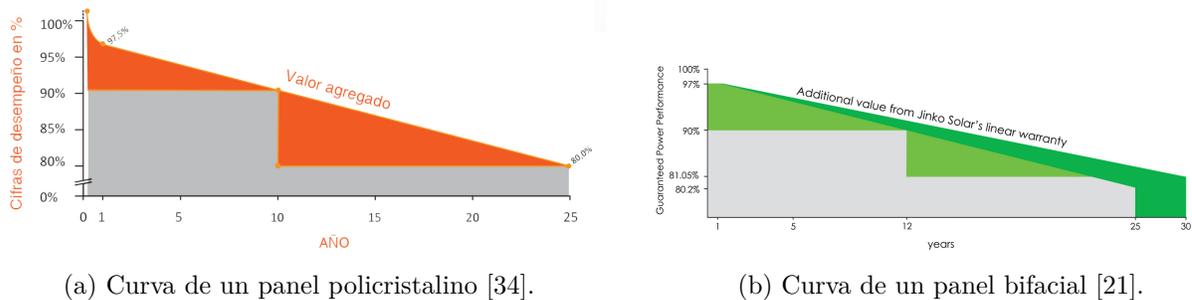


Figura 3.8: Ejemplos de curvas de desempeño o degradación.

Ante esta situación y considerando que los paneles requieren de desempeños de al menos un 80 % para continuar operativos en un parque fotovoltaico, es que se suelen utilizar estos tiempos de entre 25 a 30 años, según lo garantizado por el proveedor, para estimar la vida útil de los módulos fotovoltaicos.

Sin embargo, esta aproximación para estimar la vida útil de paneles posee ciertas falencias. En primer lugar, la garantía entregada por los fabricantes se basa en estudios de degradación acelerada realizadas bajo las condiciones estándar de laboratorio (STC), por lo que no se contemplan las condiciones reales a las que se verá expuesto el módulo, las que incluyen diversos factores externos de estrés, tales como [40]:

- Cambios de temperatura, tanto entre el día y la noche como entre el verano y el invierno.
- Estrés mecánico por factores como el viento, la nieve o los granizos.
- Estrés por agentes transportados a través de la atmósfera, tales como el polvo y la arena entre otros.
- La humedad atmosférica.

- La radiación solar, tanto la directa como la indirecta; principalmente la radiación ultravioleta, que representa un gran desafío para los materiales que componen al módulo fotovoltaico.

De hecho, en un trabajo realizado por Jordan et al. (2016) se recopilan alrededor de 11.000 datos sobre mediciones de degradación en paneles fotovoltaicos. A partir de esta revisión, el autor concluye que los factores climáticos y las configuraciones de montaje que conduzcan a mayores temperaturas en los módulos solares, pueden generar mayores tasas de degradación [22].

Además, si bien no es provechoso mantener paneles con desempeños menores a un 80% en un parque fotovoltaico; estos aún pueden ser aprovechados para otro tipo de aplicaciones, por lo que su vida útil podría ser aún mayor.

Ahora bien, más allá de la vida útil efectiva de los módulos solares, estos también pueden fallar de manera temprana, es decir, pueden presentar problemas que afecten considerablemente su desempeño y que en casos graves obligan a que el módulo sea retirado de servicio antes del tiempo estipulado por las garantías. Así, pueden haber diversos factores que provoquen este tipo de defectos. Las fallas más comunes y sus causas son:

- **Puntos calientes:** Corresponden a áreas de elevada temperatura en las células fotovoltaicas. Se producen cuando se impide el paso de corriente por una o más celdas. Debido a que estas se encuentran conectadas en serie, cuando se interrumpe el paso de corriente en una de ellas, el resto de las celdas genera un exceso de energía que es disipado en forma de calor a través de los puntos calientes.

Una de las posibles causas de esta falla corresponde al sombreadamiento, el que se puede producir por problemas como la suciedad en la superficie del panel. Otra de las causas, corresponde a problemas internos del módulo, los que se pueden generar en cualquier etapa de la vida del panel.

- **Rotura:** Se trata de quiebres o fisuras generadas en alguno de los componentes del panel, principalmente en la cubierta de vidrio. En general, se producen por factores totalmente externos, como lo pueden ser algunos factores medioambientales o fallas humanas ocurridas durante la instalación o manipulación del módulo.
- **Componentes eléctricos:** Esta es una falla que ocurre en la caja de conexión e impide el correcto funcionamiento del panel. Generalmente se produce en los diodos bypass que sirve como protección para evitar la generación de puntos calientes.
- **Delaminación:** Es la separación que puede ocurrir entre algunas de las capas que componen a los módulos fotovoltaicos. Lo más usual es que se separen el vidrio y el encapsulante de EVA debido a un desgaste producido en este último. Esta falla generalmente se produce por errores en la fabricación del panel.
- **Decoloración del encapsulante:** Es un cambio en el color del polímero que conforma al encapsulante. Se produce generalmente por una degradación inducida por la radiación solar percibida por el panel, la que disminuye una disminución en la transparencia y produce un tono amarillo en el encapsulante. Afecta directamente en la disminución de

la cantidad de luz y radiación que incide sobre las celdas solares, provocando una baja en la eficiencia y en la potencia entregada por el módulo.

- **Degradación inducida de potencial (PID):** Es un fenómeno de degradación y pérdida de potencia que se produce cuando se genera una gran diferencia de potencial entre la celda fotovoltaica y otra parte del módulo. Esta diferencia de potencial crea una fuga de corriente que repercute en pérdidas de potencia en el panel solar.

Las principales causas de esta falla se relacionan con efectos medioambientales, como la temperatura o la humedad, o problemas en la configuración del sistema fotovoltaico.

Según los datos reportados en 2017 por el laboratorio nacional de energías renovables de Estados Unidos (NREL), los modos de degradación más comunes en los módulos fotovoltaicos corresponden a puntos calientes y decoloración [23]. La siguiente figura, transmitida por el NREL, muestra el porcentaje de ocurrencia por modos de fallas:

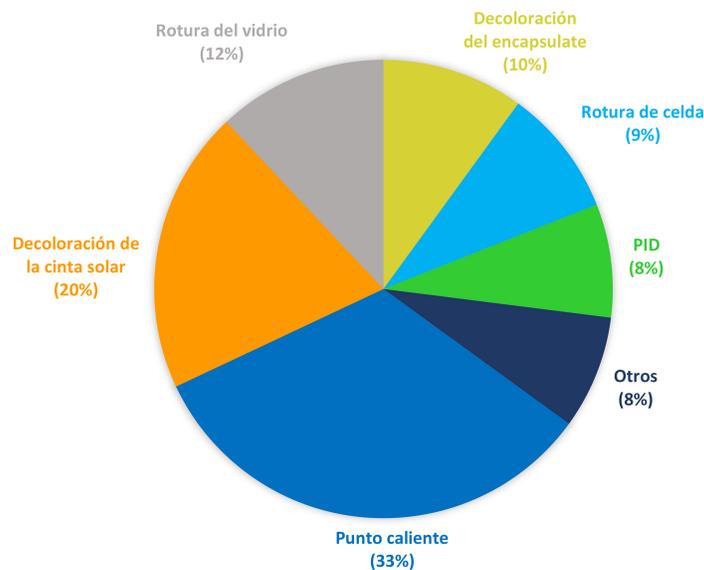


Figura 3.9: Modos de falla representativos en paneles de silicio [23].

La literatura indica que, según la experiencia, las tasas de fallas en módulos fotovoltaicos son de alrededor de un 0.15 a 0.25 % anual. Lo que implica que cerca de un 2 % de los paneles instalados en un parque solar fallen después de 11 - 12 años de iniciada sus operaciones [49].

3.4. Reciclaje, reutilización y reparación de paneles

Una vez que un módulo fotovoltaico llega al fin de su vida útil, ya sea por haber sufrido alguna falla temprana o por ser reemplazado por un panel en mejores condiciones o con mejores características, se pueden optar por diferentes alternativas para su tratamiento. Entre estas opciones se encuentran la posibilidad de trasladar los módulos hacia rellenos sanitarios, la opción de reciclar parte de los elementos que lo componen y la posibilidad de extender su vida útil mediante la reparación o reutilización del panel.

Desde un punto de vista medioambiental, el desechar un módulo fotovoltaico en un vertedero sanitario corresponde a la alternativa más contaminante. Diversos estudios han demostrado que algunos de los elementos que pueden formar parte de un panel, tales como el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el níquel (Ni), el fósforo (P) o el boro (B), podrían separarse y mezclarse fácilmente con el suelo o con el agua subterránea, generando con ello potenciales riesgos para la salud de diferentes organismos, animales silvestres y poblaciones humanas [52].

Por otra parte, el reciclaje, la reparación y la reutilización de paneles solares pueden contribuir a disminuir la generación de residuos, el uso de recursos naturales y los impactos ambientales asociados a la extracción de materias primas. Es por esto que estas alternativas traen consigo diversos beneficios medioambientales, entre los que se encuentran el aminorar el potencial del calentamiento global, evitar la liberación de elementos tóxicos en el ambiente y generar ahorros de agua y energía. Particularmente, por cada tonelada de paneles fotovoltaicos reciclados se pueden evitar las emisiones de entre 0,8 a 1,2 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) equivalentes [11].

3.4.1. Reciclaje

El reciclaje se puede definir como un proceso que tiene como objetivo convertir desechos en nuevos productos o en materias primas para la fabricación de otros artículos. En el caso de los paneles fotovoltaicos de capa fina, First Solar se encuentra a la vanguardia en cuanto a tecnologías para su reciclaje (6.2.1). Particularmente, esta empresa ha desarrollado un esquema que abarca la recolección, el transporte y un proceso de reciclaje para sus módulos de cadmio telurio que les permite recuperar hasta el 90 % del vidrio y el 95 % de los materiales conductores para ser utilizados en la fabricación de nuevos productos de vidrio y de nuevos paneles de película delgada.

Asimismo, en los últimos años, compañías como Loser Chemie GmbH y ANTEC Solar han diseñado y patentado diferentes técnicas para tratar paneles de capa fina basados en tecnologías de cadmio telurio ($CdTe$), arseniuro de galio ($GaAs$) y cobre, indio, galio y selenio ($CIGS$) [49].

En el ámbito de los paneles de silicio cristalino, en el pasado, el reciclaje se enfocaba principalmente en recuperar la cubierta de vidrio, el marco de aluminio y los cables de conexión, esto debido a la facilidad que tienen estos componentes para ser extraídos. Sin embargo, en la actualidad se han desarrollado diversos procedimientos que permiten recuperar otros materiales valiosos como silicio, plomo, aluminio, cobre, plata o bien componentes directos como la celda solar en sí misma. Aún así, es habitual que aquellos tratamientos que permiten obtener productos de mayor valor y calidad también resulten ser más complejos y costosos.

Sustentándose en esto, las técnicas de reciclaje se pueden clasificar en tecnologías de bajo, medio y alto valor según la pureza y el grado de recuperación que se obtiene de ellas. Así, por ejemplo, las celdas fotovoltaicas que conforman al panel pueden ser rescatadas en los siguientes tres grados de recuperación:

- **Silicio:** Es el nivel más bajo de recuperación; corresponde a la materia prima principal en la fabricación de celdas fotovoltaicas.

El silicio obtenido directamente desde procesos de reciclaje de módulos solares no puede ser utilizado directamente para la fabricación de nuevas celdas debido a que contiene contaminantes como los elementos dopantes u otros metales presentes en las celdas solares. Pese a esto, algunos estudios han desarrollado procedimientos que permiten eliminar los contaminantes para obtener silicio de alta pureza que puede ser utilizado nuevamente en la industria fotovoltaica u otros sectores.

En este mismo ámbito el instituto de sistemas de energía solar de Fraunhofer en conjunto con Reiling GmbH & Co. desarrollaron un proceso que les permite fabricar nuevas celdas a partir de silicio 100 % reciclado [16].

- **Oblea:** Nivel intermedio de recuperación, corresponde a una delgada lámina de material semiconductor que es utilizada como base para la producción de celdas fotovoltaicas. En algunos trabajos de investigación se ha estudiado que las obleas recuperadas desde paneles desechados pueden volver a ser utilizadas para la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos (6.1).
- **Celda:** Es el grado más alto de recuperación. Este nivel cuenta con todos los atributos técnicos necesarios para producir electricidad a través de la radiación solar.

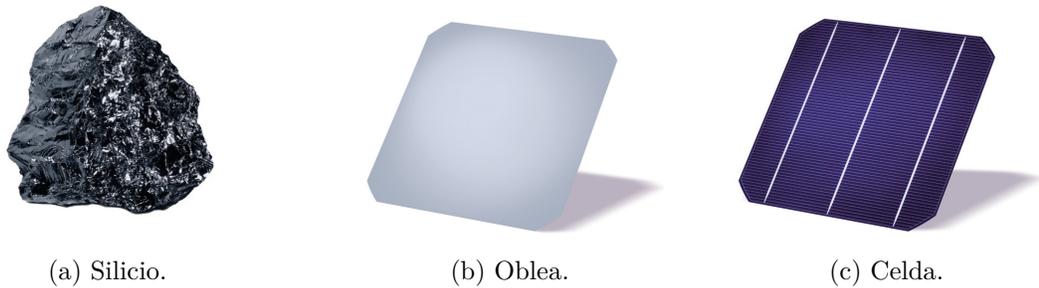


Figura 3.10: Distintos grados de recuperación de las celdas solares [43].

Otros materiales como el vidrio, el EVA o la cubierta posterior también pueden ser recuperados en distintos niveles; siendo estos triturados o laminados.

Sobre los procedimientos de reciclaje en sí mismos, estos se pueden descomponer en tres principales pasos:

1. **Desensamblaje:** Es la primera etapa de cualquier proceso de reciclaje de módulos solares. Consiste en dismantlar manual o automáticamente los marcos de aluminio y la caja de conexión desde el resto del panel.
2. **Delaminación:** Esta etapa consiste en separar los componentes laminados del panel, los que corresponden a la cubierta de vidrio, las celdas solares, el encapsulante y la cubierta posterior. Es la parte más desafiante del proceso de reciclaje debido a que el encapsulante actúa como un adhesivo que dificulta la división de los elementos.
3. **Separación de materiales y purificación:** Son los procesos necesarios para clasificar y purificar los metales presentes en la celda solar. Así, mediante métodos de separación para clasificar los materiales, se logra clasificar una fracción rica en metales la que

se le pueden aplicar tratamientos de purificación, usualmente lixiviación, para extraer metales valiosos.

Debido a la dificultad del segundo paso, es que se han desarrollado diversos tratamientos para llevarlo a cabo. Por ello la forma más utilizada para clasificar los métodos de reciclaje de paneles fotovoltaicos se basa en diferenciarlos según el tipo de procedimiento usado en la etapa de delaminación. Así, según los tratamientos utilizados, los métodos de reciclaje pueden ser divididos en métodos de delaminación mecánicos, térmicos y químicos.

3.4.1.1. Delaminación mecánica

Los métodos utilizados en los procesos de delaminación mecánica tienen como objetivo moler el panel hasta romper físicamente la unión entre los materiales. Los tratamientos más empleados incluyen trituradoras y molinos.

Las principales ventajas de estos procedimientos se deben a que se tratan de sistemas simples que se encuentran ampliamente estudiados e industrializados. Es por esto que ofrecen bajos costos de procesamiento y altos niveles de rendimiento, a la vez que son aplicables a diferentes tipos de módulos. En cuanto a sus inconvenientes, este tipo de delaminación puede generar polvo y ruido, además de que necesita complementarse con otros procesos para conseguir materiales de mayor valor.

3.4.1.2. Delaminación térmica

Estos tratamientos buscan, a través de procesos que involucran altas temperaturas, descomponer el encapsulante en sustancias volátiles, eliminando con ello la capacidad adhesiva de esta material.

Estos tratamientos facilitan la recuperación de materiales de alta pureza y permiten una limpia separación de la cubierta de vidrio y las celdas solares. No obstante, poseen altos consumos de energía y costos de inversión y operación, al mismo tiempo que cuentan con bajos rendimientos y generan emisiones de gases tóxicos.

3.4.1.3. Delaminación química

En los métodos de delaminación química se utilizan ácidos o solventes, orgánicos o inorgánicos, para disolver el encapsulante.

Cuenta con casi las mismas ventajas que los métodos térmicos, con la diferencia de que produce menos daño en el vidrio. Entre sus desventajas se encuentran los altos costos, la peligrosidad y la generación de residuos asociados al uso de disolventes.

3.4.1.4. Métodos de separación

Los métodos de separación más utilizados en la industria corresponden a:

- **Separador electrostático:** Se trata de un equipo que permite separar materiales en base a su conductividad eléctrica. Esta compuesto por un rotor conectado a tierra y dos electrodos conectados a alto voltaje.

Su proceso de operación comienza con cargar eléctricamente, mediante un campo eléctrico producido por un electrodo ionizante, a las partículas de los diferentes materiales

a separar. Posteriormente, un segundo electrodo genera un campo que lleva a las distintas partículas hacia el rotor. Con esto, las partículas conductoras no logran adherirse al rotor debido a que se descargan al hacer contacto físico con este, mientras que las partículas no conductoras consiguen permanecer unidas debido a las fuerzas eléctricas, lo que es aprovechado para disociar entre los diferentes materiales.

Es por esto, que para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, este método es aprovechado para separar grupos de cobre, silicio y una mezcla entre polímeros y vidrio.

- **Separador óptico:** Corresponde a un sistema que utiliza sensores de luz y aire comprimido para clasificar materiales según su color. En el reciclaje de paneles solares este método se puede aprovechar para dividir entre fragmentos de celdas solares y vidrio.
- **Separador de cribado vibratorio:** Consiste en una máquina que sirve para clasificar partículas según su tamaño. Se compone por una plataforma vibratoria inclinada que contiene perforaciones de determinadas dimensiones para filtrar a aquellas partículas que cuenten con un tamaño menor al de las dimensiones.

En el caso de los módulos solares triturados, las diferencias entre las elasticidades bajo esfuerzo cortante de los distintos materiales permite que las partículas obtenidas mediante métodos de delaminación mecánica tengan diferentes tamaños. Especialmente, este separador puede usarse para dividir entre polímeros y vidrio.

- **Separador por densidad:** Este es un método utilizado para dividir partículas según su densidad. Para conseguir esto se utiliza un fluido de densidad intermedia, conocido como fluido de separación para que al agregar una mezcla de partículas, aquellas que posean menor densidad que el fluido floten y aquellas de mayor densidad se hundan.

En el reciclaje de módulos solares puedes ser utilizado para separar entre mezclas de polímeros, vidrio y silicio.

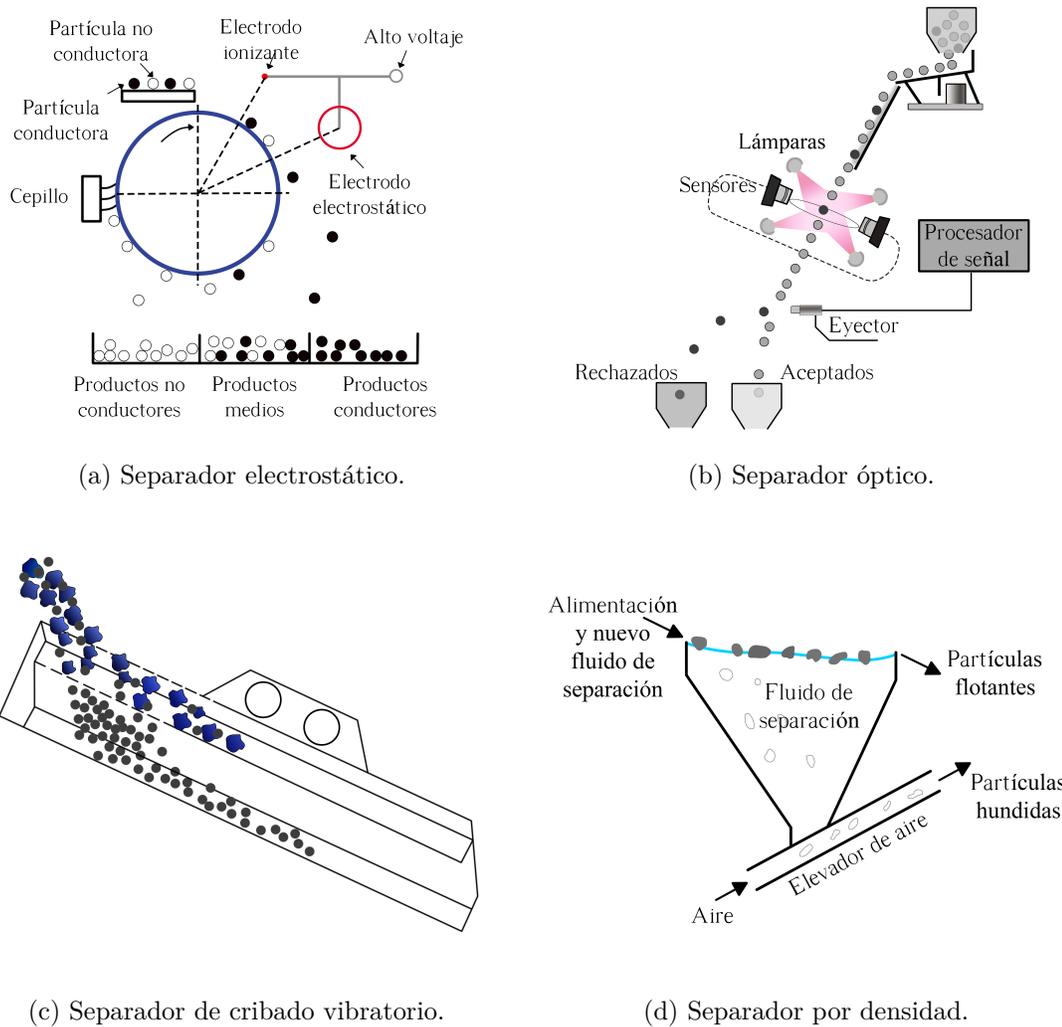


Figura 3.11: Principales tecnologías para la separación de materiales [10].

3.4.2. Reparación

La reparación se define como el proceso en el cual se arregla un objeto que ha sido roto o estropeado. En cuanto a los paneles fotovoltaicos, muchas de sus posibles fallas tempranas pueden ser reparadas mediante procedimientos relativamente sencillos. Por ejemplo, daños en elementos como diodos, cajas de conexión, cables o conectores pueden ser enmendados mediante el reemplazo del componente por otro con características similares [50].

En el mismo sentido, algunos autores han explorado soluciones para arreglar cubiertas posteriores con superficies agrietadas. Proponiendo el uso de algunos sellantes o revestimientos para cubrir las grietas generadas [2], [51].

Sin embargo, en cualquier procedimiento de este tipo, luego de que el panel sea reparado se deben realizar pruebas que permitan asegurar nuevamente la seguridad y el desempeño del módulo. Algunas de estas pruebas pueden ser:

- **Flash test:** Esta prueba, llevada a cabo bajo las condiciones estándar de laboratorio,

consiste en exponer al módulo a una fuente de luz para obtener y medir los parámetros característicos del panel fotovoltaico.

- **Electroluminiscencia:** Esta prueba consiste en exponer los módulos fotovoltaicos a una corriente eléctrica para luego ser fotografiados mediante una cámara de infrarrojos. A través de las imágenes obtenidas se puede determinar si es que las celdas del panel presentan algún problema.
- **Prueba de puntos calientes:** Mediante esta prueba se puede determinar si existen micro-roturas que en un futuro puedan originar defectos por puntos calientes en el módulo fotovoltaico.
- **Aislamiento:** Esta prueba permite verificar que el panel se encuentre correctamente aislado y evitar con ello el riesgo de que produzca descargas eléctricas durante su operación. En ella, a través de una sonda de medición de aislamiento, se conectan los terminales módulo con alguna parte metálica del mismo que es energizada para realizar las mediciones.

3.4.3. Reutilización

La reutilización puede entenderse como el proceso en el cual se le otorga otro uso a un producto con el fin de extender su vida útil. En el caso de los módulos fotovoltaicos es viable reutilizar directamente aquellos que estén libres de defectos y cuenten con desempeños razonables.

Por este motivo, esta opción es la alternativa ideal para muchos paneles que son dados de baja aún cuando funcionan con desempeños cercanos al 80 %. La reutilización puede otorgarles a estos módulos nuevos usos mediante mercados de segunda mano, en donde pueden ser ofrecidos como productos de menor calidad hasta a un 50 % del precio de un panel nuevo [48]. De todas maneras, no son muchas las aplicaciones en las cuales estos módulos sean preferidos por sobre unos nuevos, ya que además de presentar menores desempeños y contar con garantías menores, los costos de los módulos no representan el costo total de una instalación fotovoltaica y, por lo tanto, la compra de paneles de menor valor puede no verse reflejada en mayores ahorros económicos. Aún así, es posible encontrar un mercado de interés, en proyectos de generación de energía de pequeña escala y aplicaciones domésticas.

A diferencia de la reparación, los módulos que pueden ser reutilizados no han presentados fallas y por lo tanto no se requiere necesariamente de realizar pruebas que aseguren su seguridad. Aún así, igualmente se requiere examinar ciertos parámetros para conocer el estado del módulo y asegurar que aún es viable su uso para la generación de energía.

Para resolver si un módulo pueda ser reutilizado se suele seguir el siguiente procedimiento:

1. Limpiar el panel para quitar restos de polvo u otras partículas que puedan quedar en su superficie.
2. Inspección visual para descartar los paneles que tengan daños visibles que dificulten o imposibiliten su reutilización.
3. Medición de parámetros característicos, incluyendo test de eficiencia para recertificar los módulos.

3.4.4. Viabilidad económica del reciclaje

Aún cuando ciertos paneles puedan ser reparados o reutilizados, el destino final de cualquier módulo fotovoltaico se deliberará entre las alternativas del reciclaje y los rellenos sanitarios. Más aún, la mayoría de las veces se opta por la opción del desecho.

Lo anterior se debe al hecho de que la viabilidad técnica y los beneficios medioambientales propios del reciclaje no son suficientes para asegurar que este se produzca. Al momento elegir el destino de un módulo el factor económico puede ser determinante y, desde esta perspectiva, el reciclaje es una alternativa desfavorable. Por ejemplo, según la NREL, en Estados Unidos, los costos por reciclaje de paneles fotovoltaicos pueden ser entre 9 a 15 veces mayores que los costos de desechar un módulo en un vertedero [30].

La principal razón por la cual el reciclaje no es conveniente desde un punto de vista económico esta asociada a la composición del panel. En los módulos fotovoltaicos, el vidrio representa más del 75 % de su peso, sin embargo, es también de los materiales con menos valor en el panel. Asimismo, otros materiales que poseen alto valor comercial como el cobre, el aluminio o la plata se encuentran en fracciones menores en cuanto mayor es su precio comercial.

Por este motivo, las regulaciones medioambientales pueden tener un rol fundamental en impulsar el reciclaje como opción para el fin de vida útil de módulos fotovoltaicos. Por ejemplo en la Unión Europea hay normativas que a partir de 2019 exigen cumplir con ciertos porcentajes de recuperación/reciclaje para los residuos eléctricos y electrónicos, dentro de los cuales se ubican los módulos fotovoltaicos [50]. Acá en Chile, una normativa que cumple un rol similar corresponde a la ley 20.920.

3.4.4.1. Ley 20.920

La ley N° 20.920 también conocida como ley REP fue publicada en el diario oficial el primero de junio de 2016 y tienen como objetivo “disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente” [3].

Para ello, la normativa hace responsables a los productores de ciertos artículos llamados “productos prioritarios” de organizar y financiar la gestión de los residuos que se deriven de los productos que ha puesto en circulación en el mercado. Además, los productores están sujetos a cumplir ciertas metas, las que corresponden a una cantidad, representada como porcentaje, del total de productos de los cuales se debe asegurar su gestión al final de su vida útil.

Al día de hoy la lista de productos prioritarios incluye neumáticos, envases, embalajes, aceites lubricantes, pilas, baterías y aparatos eléctricos y electrónicos. Dentro de la categoría “aparatos eléctricos y electrónicos” se ubican los paneles fotovoltaicos, los que por lo tanto, también se verán gobernados por esta normativa, obligando a sus fabricantes a optar por soluciones más amigables con el medio ambiente para administrarlos en el fin de su vida útil.

Capítulo 4

Parques fotovoltaicos en Chile

4.1. Parques fotovoltaicos

Los parques o campos fotovoltaicos corresponden a terrenos de grandes dimensiones en los cuales se ubican paneles solares interconectados entre si para captar radiación solar y transformarla en energía eléctrica. La figura que se muestra a continuación ilustra la composición general de un parque fotovoltaico:

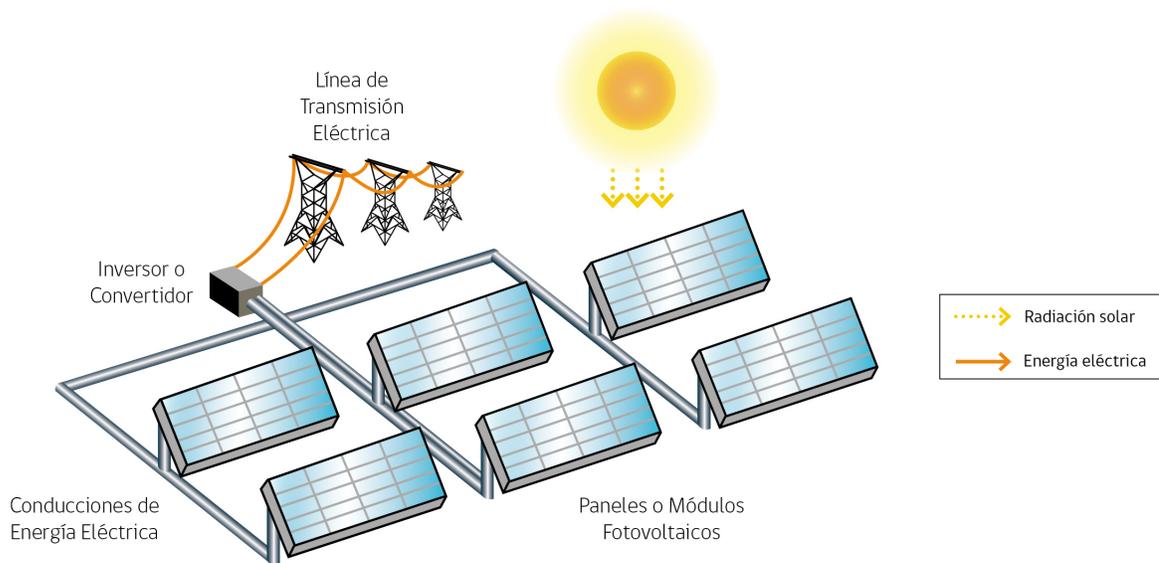


Figura 4.1: Secuencia del funcionamiento de un parque solar [38].

Los componentes más importantes en el funcionamiento de un parque fotovoltaico corresponden a:

- **Paneles fotovoltaicos:** Son la parte principal del parque fotovoltaico, capturan la luz del sol para producir energía eléctrica en forma de corriente continua. Pueden ser montados en estructuras fijas o estructuras móviles para el seguimiento del sol.
- **Conducciones de energía eléctrica:** Es el medio de transporte por el cual se canaliza la electricidad producida por los paneles hacia los inversores eléctricos, y desde estos hacia la subestación eléctrica.

- **Inversor o convertidor:** Es el equipo encargado de transformar la energía continua producida por los paneles en corriente alterna.
- **Subestación eléctrica:** Estas son instalaciones que elevan la tensión de la corriente generada por los inversores a niveles superiores a los 60 [kV].
- **Línea de transmisión eléctrica:** Son el conjunto de cables y estructuras metálicas encargadas de transmitir y distribuir la electricidad generada por el campo.

Además, algunos parques incluyen un sistema de almacenamiento con baterías, el que les permite suministrar energía aún en momentos en que esta no puede ser generada, como en días nublados o durante la noche.

4.2. Situación de los parques solares Chilenos

Sobre la situación de los campos fotovoltaicos en Chile, se llevó a cabo el levantamiento de una base de datos con información de las características más importantes de los parques instalados hasta agosto de 2022. Además del nombre y el año de puesta en servicio, los antecedentes que fueron recopilados para cada uno de los parques considerados son¹:

- **Vida útil:** Corresponde a un periodo específico de tiempo, dado en número de años, en el que se contempla que se ejecutará el proyecto. Una vez finalizado este periodo comienza el desmantelamiento de las obras del parque.
- **Potencia instalada:** Es la potencia nominal del total de módulos fotovoltaicos que se encuentran instalados en el parque fotovoltaico.
- **Paneles fotovoltaicos:** En este aspecto se recopiló información sobre el tipo, cantidad y peso estimado de los parques fotovoltaicos utilizados en el parque.
- **Ubicación:** Se registró la información sobre la región donde se ubica el parque solar y las coordenadas, latitud y longitud, de un punto representativo de la localización del campo.

En total, se recopiló la información de 194 parques fotovoltaicos, de los cuales 173 cuentan con potencias mayores o igual 3,0 [MW]. En conjunto, los 194 campos solares cuentan con una potencia instalada de 6.755,2 [MW], lo que corresponde al 98,7% de la capacidad total de la tecnología solar fotovoltaica instalada en Chile hasta agosto de 2022.

En relación a la vida útil, de los 194 parques hay 8 que no declaran esta información; estos corresponden a los campos solares Illapel 5x, Calle larga, Lo sierra, Bicentenario, Marín, Luna del norte, Sol del norte y Santa Julia.

¹ Los detalles sobre la metodología utilizada y los datos compilados se encuentran en el anexo A.

El gráfico que se muestra a continuación muestra la distribución de la vida útil declarada por los restantes 186 parques solares:

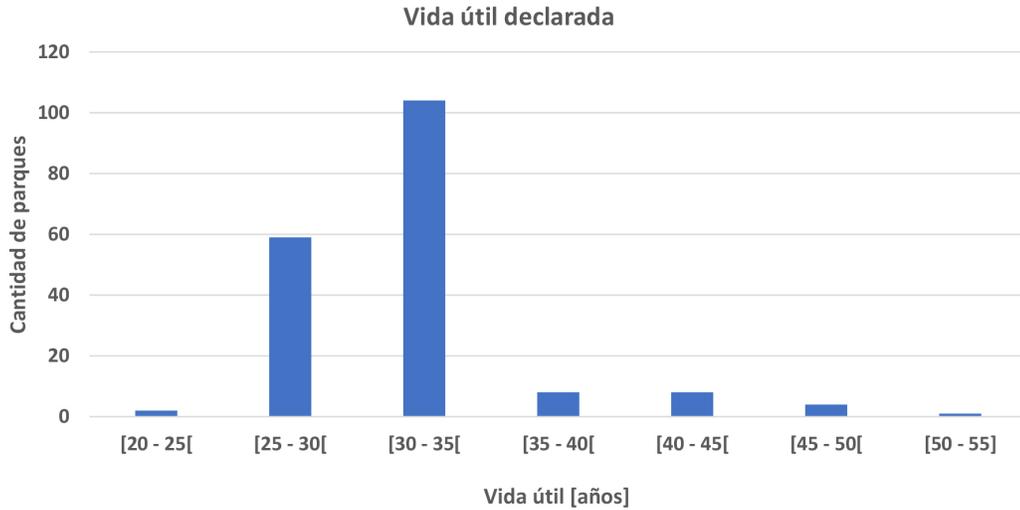


Figura 4.2: Distribución de la vida útil declarada por los parques solares.

En su mayoría, los campos fotovoltaicos se basan en las garantías entregadas por los fabricantes de módulos para establecer que su vida útil será de 25 o 30 años. Por esta razón, son 59 los parques que declaran una vida útil de 25 años y 103 los que declaran que esta será de 30 años. Los parques con mayor vida útil declarada corresponden al parque Pampa tigre con 51 años y los campos La frontera, Panquehue II, Marchigue II y La esperanza II con 45 años.

Respecto a los paneles fotovoltaicos, se estima que entre los 194 parques poseen instalados un total de 21.621.099 módulos, los que incluyen las tecnologías de silicio policristalino (Psi), silicio monocristalino (Msi), silicio monocristalino bifacial (MBsi) y capa fina de cadmio telurio (CdTe). El siguiente gráfico muestra la distribución de estos paneles en total nacional:

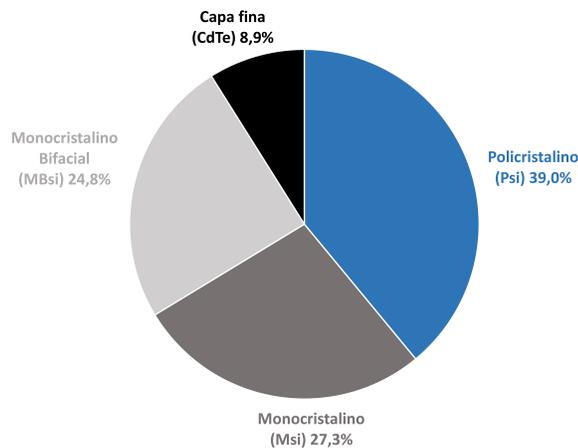


Figura 4.3: Distribución de los tipos de paneles instalados.

La tecnología predominante corresponde a la de silicio policristalino, seguida de la de silicio monocristalino, la de monocristalino bifacial y en último lugar la de capa fina.

El siguiente gráfico ilustra como ha sido la instalación de paneles por año y tipo de tecnología a partir del 2014:

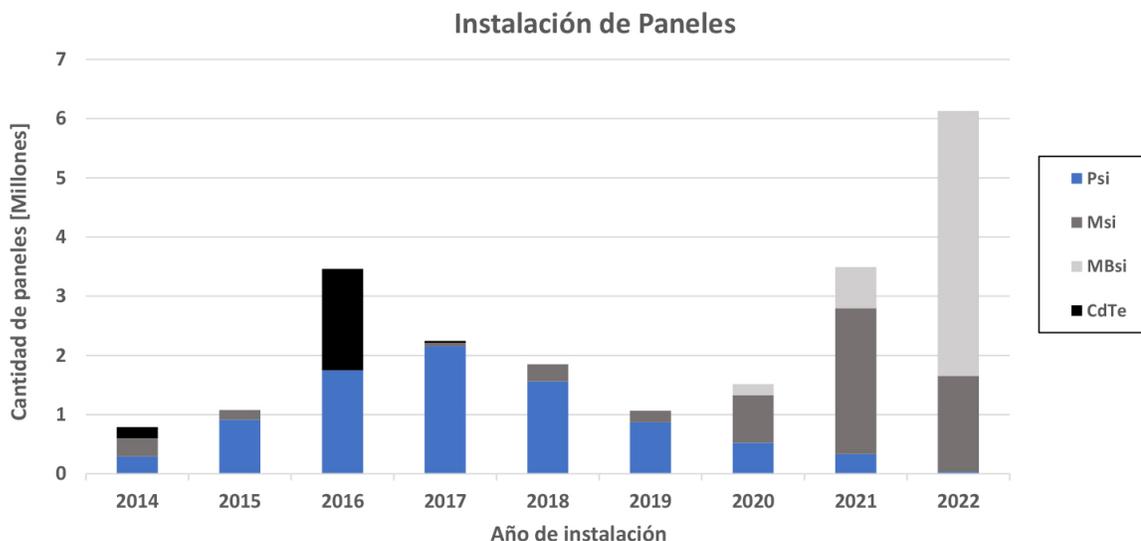


Figura 4.4: Instalación de tipo de tecnologías por año.

Se puede apreciar en este gráfico que al menos desde 2014 en Chile han habido instalados paneles unificiales de silicio cristalino y de capa fina, específicamente de cadmio telurio. Mientras que los módulos bifaciales han tomado gran protagonismo en los últimos años, contando con un aumento considerable durante el año 2022.

Dentro del mismo análisis, es notorio que a partir del año 2017 se advierte una tendencia a la baja en la cantidad instalada de módulos policristalinos. Esta propensión se podría atribuir a que en los últimos años se ha optado por paneles de silicio monocristalinos, tanto unificiales como bifaciales, en virtud de sus mayores potencias y eficiencias de conversión.

Revisando por tecnología, los campos solares que han contribuido mayormente a la instalación de paneles fotovoltaicos, son:

- **Policristalinos:**

- En 2016 el parque “Carrera Pinto” con 560.832 módulos.
- En 2017 los parques “El Romero Solar” y “Finis Terrae” con 776.000 y 518.320 paneles respectivamente.

- **Monocristalinos unificiales:**

- En 2021 los campos “Atacama Solar II” y “Margarida I y II” con 500.000 y 583.886 módulos.

– En 2022 el parque “Sol del Desierto” con 582.930 paneles.

• **Monocristalinos bifaciales:**

– En 2022 los parques solares “Campos del Sol I”, “Domeyko 2” y “Sol de Lila” con 974.000, 472.590 y 407.400 módulos respectivamente.

• **Capa fina de cadmio telurio:**

– En 2014 el parque “Diego de Almagro” con 186.240 paneles.

– En 2016 el capo solar “Luz del Norte” con 1.710.720 módulos.

– En 2017 con el parque fotovoltaico “El Boco I” con 33.333 paneles montados.

Igualmente, el gráfico de a continuación muestra como ha sido el desarrollo de la potencia instalada por año y tecnología a partir desde 2014:

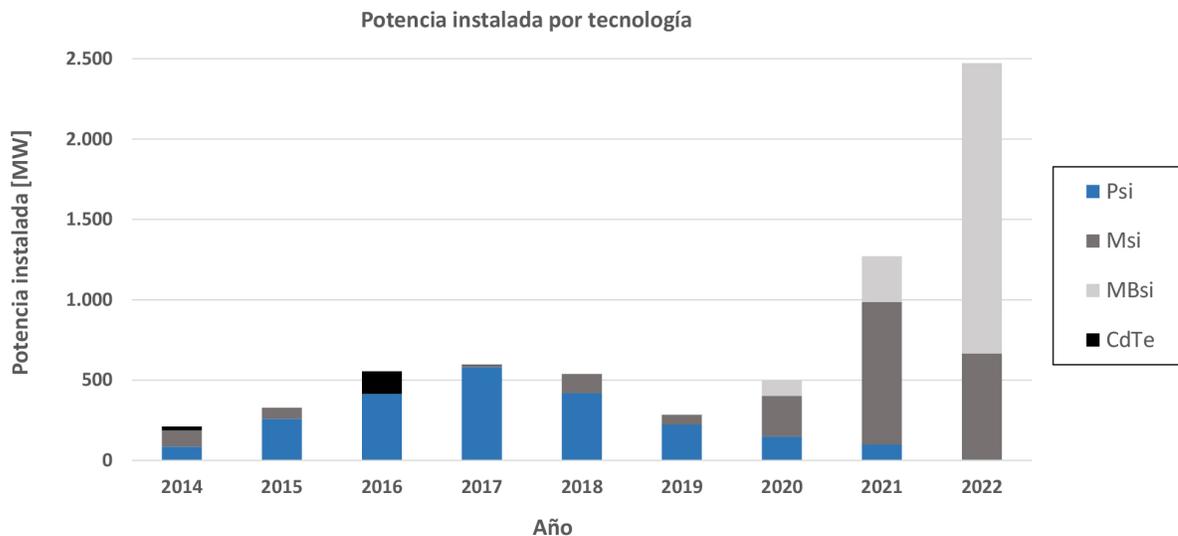


Figura 4.5: Capacidad instalada por año y tecnología.

Se puede notar una tendencia a aumentar la capacidad instalada cada año, a excepción de los años 2019 y 2020. Lo que puede ser explicado en parte por los impactos del contexto social y la pandemia global sufrida en aquellos años. Asimismo, se observa que en los últimos dos años ha habido un importante aumento en la capacidad instalada en energía fotovoltaica. Este aumento se explica por la puesta en marcha de grandes parques solares que han optado a su vez por la incorporación de tecnologías más eficientes que a su vez permiten alcanzar mayores potencias.

En total se han instalado 2.233 [MW] en paneles policristalinos, 2.168 [MW] en paneles unificiales monocristalinos, 2.187 [MW] en módulos monocristalinos bifaciales y 168 [MW] en paneles de capa fina.

Sobre la ubicación y distribución de los parques solares, la siguiente tabla contiene los datos de la cantidad de parques y paneles fotovoltaicos en conjunto con la capacidad instalada que hay por región:

Tabla 4.1: Cantidad de parques, paneles y capacidad instalada por región.

Región	Parques	Paneles	Potencia [MW]
Arica y Parinacota	1	23.000	6,2
Tarapacá	8	1.468.575	433,4
Antofagasta	31	7.744.767	2.684,3
Atacama	27	8.610.391	2.467,4
Coquimbo	17	678.218	260,9
Valparaíso	26	545.147	161,2
Metropolitana	27	1.214.602	347,8
Bernardo O'Higgins	25	608.245	174,6
Maule	20	466.852	139,1
Ñuble	9	184.886	59,6
Biobío	3	76.416	20,7

Es así, que en Chile se pueden encontrar parques fotovoltaicos entre la región de Arica y Parinacota y la región del Biobío. Sin embargo, los parques más importantes, en cuanto a número de paneles montados y capacidad instalada, localizan en su mayoría la zona norte del país, mayoritariamente en las regiones de Antofagasta y Atacama. A su vez, los datos recopilados sobre la capacidad instalada en cada región son consistentes con los datos otorgados por el Sistema Eléctrico Nacional mostrados en la figura (3.1).

De forma más específica, la tabla que se encuentra a continuación contiene los datos de la cantidad de paneles por tecnología que hay montados en cada región:

Tabla 4.2: Tipos de paneles instalados por región.

Región	CdTe	Psi	Msi	MBsi
Arica y Parinacota	0	23.000	0	0
Tarapacá	0	636.119	832.456	0
Antofagasta	0	3.070.045	2.044.351	2.630.371
Atacama	1.896.960	2.441.461	1.789.290	2.482.680
Coquimbo	0	119.462	502.024	56.732
Valparaíso	33.333	254.650	224.134	33.030
Metropolitana	0	1.032.343	155.323	26.936
Bernardo O'Higgins	0	467.733	127.744	12.768
Maule	0	303.756	101.888	61.208
Ñuble	0	8.820	127.782	48.284
Biobío	0	76.416	0	0

Capítulo 5

Estimación de desechos

Tal como fue revisado en la sección anterior, en Chile hay instalados más de 21 millones de paneles solares, los que, en base a la revisión y estimación de sus pesos, equivalen a más de 511.400 toneladas. El siguiente gráfico muestra la distribución de masa por tipo de tecnología del total de módulos fotovoltaicos que han sido contabilizados:

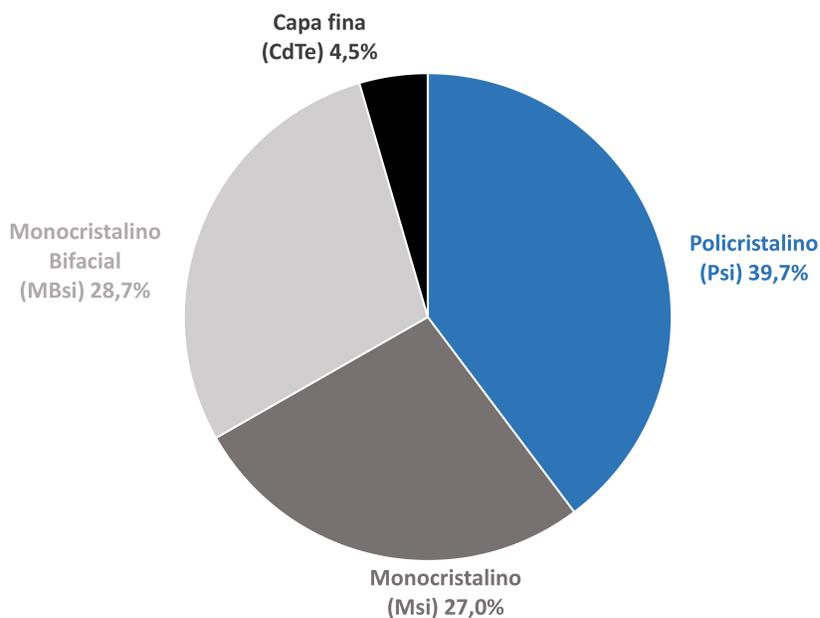


Figura 5.1: Distribución másica por tecnología.

De este modo, los paneles unificaciales de silicio policristalino aportan la mayor parte de la masa total, seguidos por los módulos unificaciales monocristalinos, los bifaciales cristalinos y los de capa fina. Esta distribución se debe tanto a la cantidad de paneles por tecnología que hay instalados como a los pesos unitarios de este tipo de módulos. Por sus dimensiones, los paneles de capa fina suelen ser los más livianos, mientras que por su composición, los paneles bifaciales que cuentan con cubierta exterior y posterior de vidrio son los más pesados.

Debido a que estos módulos están conformados por una serie de materiales, una vez que finalicen su vida útil, se generarán grandes volúmenes de elementos que podrán estar disponibles para su reciclaje. Para estimar los tipos y cantidades de componentes que serán desechados, es necesario conocer la composiciones características de los tipos de módulos que actualmente hay instalados. Por ello, a continuación se encuentran tabulados, junto a sus contribuciones porcentuales a la masa del panel, los materiales presentes en un módulo de capa fina en base a cadmio telurio estándar:

Tabla 5.1: Distribución de materiales en paneles de cadmio telurio [27].

Material	Porcentaje [%]
Vidrio	95,3
Polímeros	3,8
Cobre	0,6
Aluminio	0,1
Cadmio	0,1
Telurio	0,1
Plata	0,005
Zinc	0,0

Análogamente, la tabla que se encuentra a continuación muestra la distribución de materiales para un panel convencional de silicio cristalino bifacial:

Tabla 5.2: Distribución de materiales en paneles cristalinos bifaciales [18].

Material	Porcentaje [%]
Vidrio	86,8
Aluminio	7,9
Polímeros	2,9
Silicio	1,6
Cobre	0,5
Plomo	0,05
Plata	0,1
Boro	0,05
Fósforo	0,05
Estaño	0,05
Dióxido de estaño	0,05

La distribución de materiales en un panel de silicio cristalino unifacial estándar se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.3: Distribución de materiales en paneles cristalinos unifaciales [12].

Material	Porcentaje [%]
Vidrio	75,0
Aluminio	10,0
Polímeros	8,0
Silicio	5,0
Cobre	0,8
Plomo	0,1
Plata	0,005

Con estos datos presentes y para estimar los volúmenes de desechos que se producirán, se plantean dos escenarios bajos los cuales se podría comenzar con el desmantelamiento a gran escala de los módulos instalados en los parques solares estudiados.

5.1. Escenario 1: Vida útil declarada

Para este primer escenario se realizan los siguientes supuestos:

- Los parques fotovoltaicos desmantelarán los paneles de sus instalaciones una vez cumplida la vida útil expuesta en su declaración de impacto ambiental.
- Para aquellos parques que hayan declarado una vida útil mayor a 30 años se considerará que se realizará un recambio de paneles a los 30 años desde la puesta en marcha del campo solar.

Frente a estas suposiciones, el panorama de la cantidad de paneles desmontados cada año se presenta en la siguiente figura:

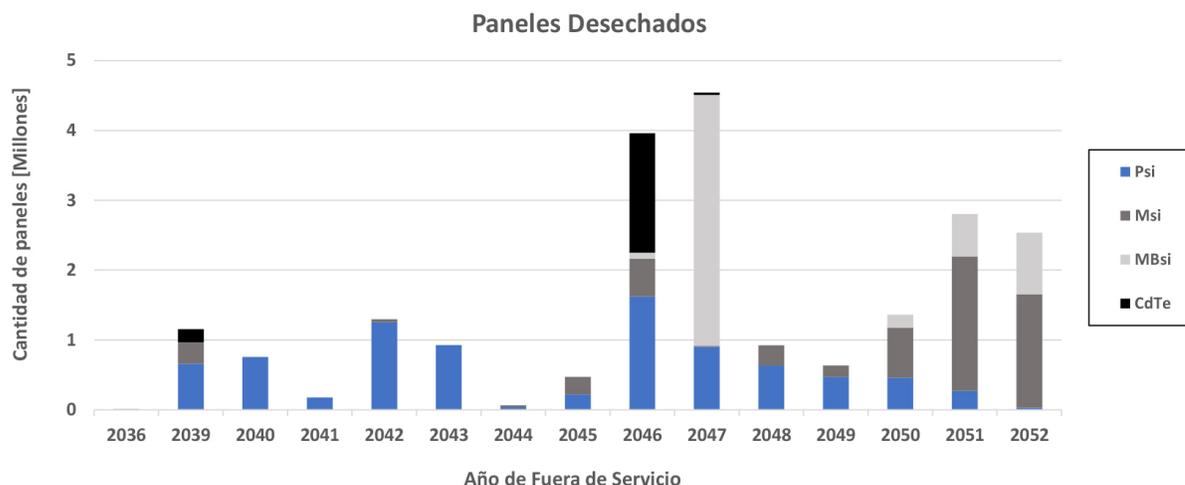


Figura 5.2: Flujo de paneles desechados bajo el primer escenario.

El desmontaje de paneles comenzaría entonces a partir del año 2036 y acabaría en el 2051. Los “peaks” de paneles desinstalados ocurrirían en los años 2046 y 2047, siendo ocasionados principalmente por grandes parques como “Luz del Norte”, “Conejo Solar”, “Campos del Sol I” y “El Romero”.

La gráfica de a continuación ilustra los volúmenes de materiales producidos bajo este escenario:

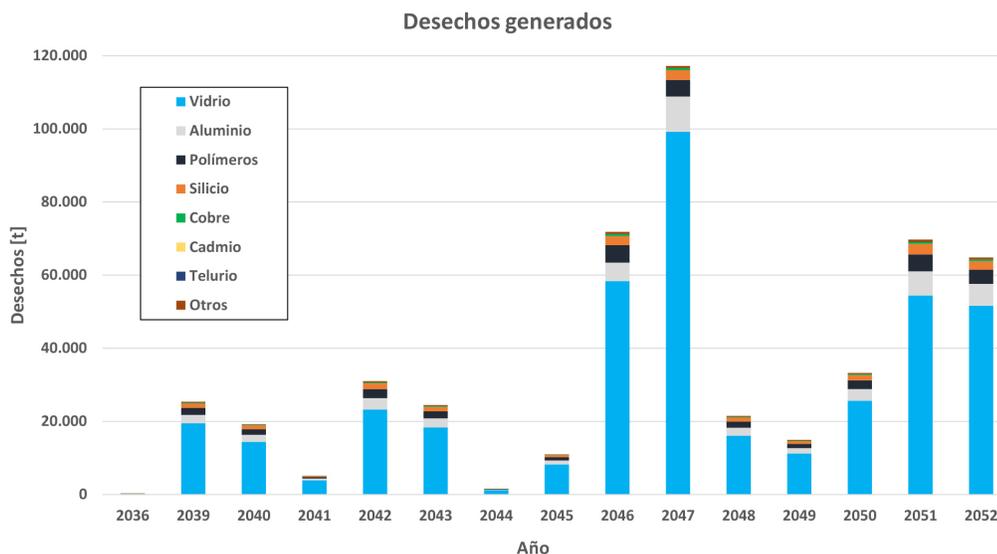


Figura 5.3: Materiales desechados por fin de vida útil de paneles.

La gran cantidad de paneles que serían desmantelados durante el 2047 se verían reflejados en un “peak” de casi 120.000 toneladas de materiales, en los que alrededor del 85 % correspondería a vidrio.

5.2. Escenario 2: 16 años

Si bien es esperable que los paneles fotovoltaicos cuenten con una vida útil de entre 25 a 30 años, hay diferentes factores, como las proyecciones del costo de energía, la caída en los costos de los módulos solares y el aumento de sus eficiencias de conversión, que plantean escenarios en los cuales, desde un punto de vista económico, se sugiere que es beneficioso realizar un recambio de módulos mucho antes de lo esperado. Así, por ejemplo, se manifiesta la posibilidad de que paneles que hayan sido instalados entre 2010 y 2020, que en un principio cuentan con fechas estimadas de reemplazo entre 2040 y 2050, sean sustituidos a partir de 2030 [41].

Desde este punto de vista y debido a los diversos factores que pueden influir en esta decisión, resulta complejo determinar el momento adecuado para producir este recambio acelerado de paneles fotovoltaicos. En este contexto, Rosas (2022) propone un modelo que, aplicado a cualquier parque fotovoltaico, permite calcular el período adecuado para producir el reemplazo de sus módulos solares [36]. Para esto, el modelo usa datos propios del parque,

como la inversión, la capacidad instalada y su ubicación, en conjunto con modelos de proyección para la eficiencia, tasa de degradación y precio de los nuevos módulos entre otros.

Similarmente, Romero Campos (2019) utiliza un procedimiento más simple que le permite concluir que el tiempo óptimo de reemplazo para un panel fotovoltaico se encuentra entre los 16 y 18 años después de su instalación [35]. Si se toma esta simplificación, considerando el período de reemplazo a los 16 años, se presentaría el siguiente panorama:

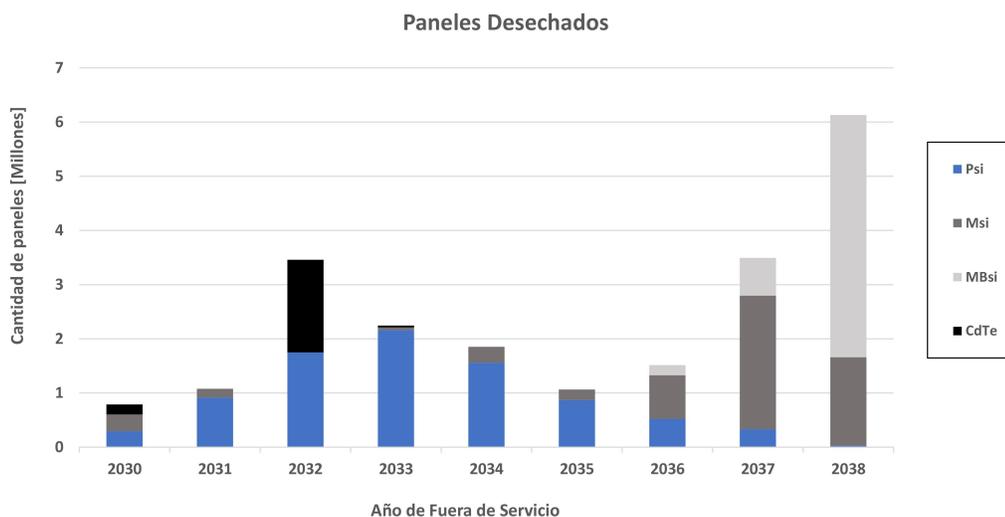


Figura 5.4: Flujo de paneles desechados bajo el segundo escenario.

Los módulos serían desmantelados en un período de 9 años a partir del 2030. Al considerarse un tiempo de desmantelamiento fijo para cada parque, el flujo de paneles desinstalados se presentaría de la misma forma en que fueron instalados y que se representa en la figura (4.4). Los volúmenes de materiales desechados serían entonces:

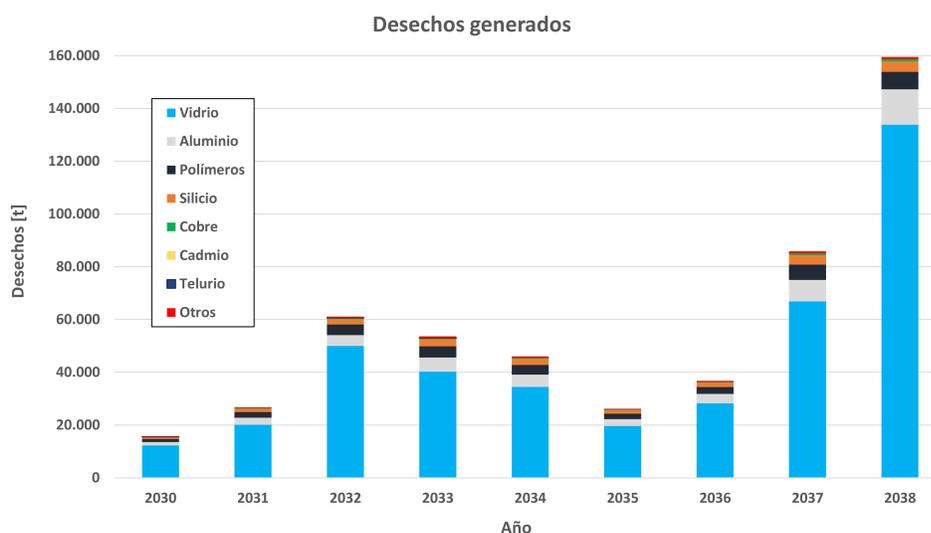


Figura 5.5: Materiales desechados por fin de vida útil de paneles.

Capítulo 6

Revisión y selección de procesos

6.1. Trabajos de investigación

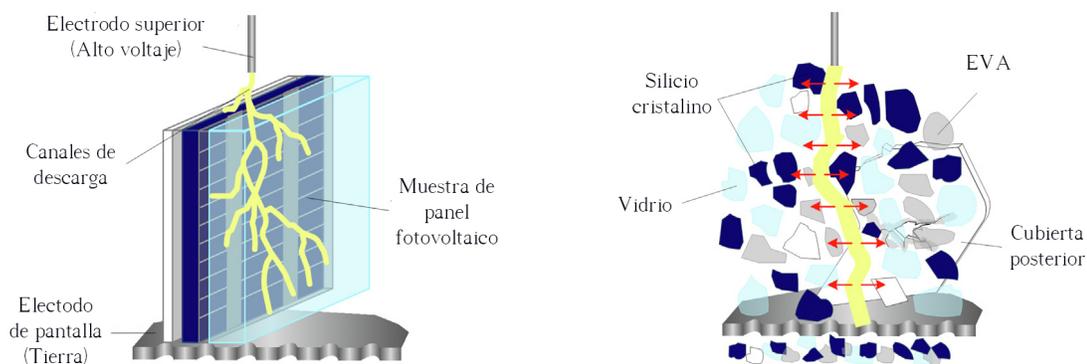
La siguiente es una lista de diferentes trabajos de investigación en los que se exploran distintas opciones para el reciclaje de módulos fotovoltaicos:

1. **Granata *et al.*, 2014:** Mediante el estudio de distintos procesos se propone un tratamiento que utiliza trituración, métodos térmicos y tamizado para reciclar paneles basados en silicio y cadmio telurio. El procedimiento propuesto permite recuperar hasta un 85 % del total en peso de los paneles [17].
2. **Shin *et al.*, 2017:** En su trabajo presenta un tratamiento para recuperar obleas de silicio de paneles fotovoltaicos. En el proceso expuesto se utiliza un método térmico para separar las celdas solares del panel. Después se usan diferentes químicos en conjunto con tratamientos térmicos para disolver los componentes metálicos y la capa antirrefletores de la celda. Con las obleas obtenidas se fabrican nuevas células fotovoltaicas libres de plomo, las que presentan características similares a celdas nuevas [39].
3. **Lee *et al.*, 2017:** En este estudio se investigan las causas de rotura de celdas fotovoltaicas que son expuestas a métodos térmicos y se proponen pretratamientos sencillos para evitar este fenómeno durante la eliminación del encapsulante por medio de la combustión. Se comprueba que mediante los procesos recomendados es posible obtener obleas de silicio que pueden aprovecharse para la fabricación de nuevas celdas [24].
4. **Prasad *et al.*, 2022:** En este trabajo de investigación se buscan optimizar parámetros para mejorar un procedimiento de reciclaje que utiliza métodos químicos y térmicos. En particular se estudian parámetros como el tipo de solvente, la posición del panel y el efecto de la variación de la temperatura sobre la solubilidad del encapsulante. Se concluye que el tricloroetileno a 70° aplicado en una proporción dada y con el módulo en posición horizontal, corresponden a una configuración eficaz para lograr la separación de los componentes [32].

Los siguientes corresponden a trabajos de investigación en los que se proponen y/o estudian técnicas innovadoras para el reciclaje de paneles fotovoltaicos:

6.1.1. Song *et al.*, 2020

Song realizó un estudio en el cual optimizó y calculó los consumos eléctricos del proceso conocido como “High voltage fragmentation (HVF)” o fragmentación de alto voltaje, aplicado al reciclaje de paneles fotovoltaicos. Planteando este método como una alternativa para la trituración de módulos solares.



(a) Canales de descarga en la interface.

(b) Fragmentación de componentes.

Figura 6.1: Principios y procesos de fragmentación por alto voltaje [45].

El procedimiento estudiado consiste en utilizar un electrodo para aplicar ciclos de carga y descarga, en alto voltaje y en determinada frecuencia, a una materia sólida que se encuentra sumergida en un líquido dieléctrico para ser fragmentada. Las descargas en alto voltaje generan finos canales de plasma que se propagan a altas temperaturas a través del sólido, provocando fracturas en los puntos mecánicamente débiles que se encuentran entre las interfaces de los diferentes materiales. Consiguiendo con esto, romper los puntos de unión de los diferentes materiales para su fragmentación.

En el estudio, Song adoptó este método para dismantlar paneles solares y estudiar los efectos de los parámetros de descarga (voltaje peak y número de pulsos) en el tamaño promedio, la morfología de la superficie y la distribución del tamaño de las partículas obtenidas.

Entre los principales resultados de este estudio se encuentra el hecho de que se detectó que el tamaño de las partículas decrece con el aumento del número de pulsos y la amplitud del voltaje, encontrando además los valores óptimos para estos parámetros. También se determinó que en la mayoría de los metales, las partículas resultantes se concentran en tamaños fragmentados menores a 1 [mm].

En base a esto, el estudio plantea al HVF como una nueva opción para ser utilizada en un futuro en sistemas industriales automáticos para el reciclaje de paneles fotovoltaicos. En comparación con el método mecánico, este procedimiento produce menos desperdicios y genera un mejor efecto de trituración. Al mismo tiempo a diferencia de los métodos térmicos

y químicos convencionales, la fragmentación de alto voltaje no genera contaminantes adicionales. Pese a esto, las condiciones requeridas para lograr la correcta segmentación de los materiales dificultan la fabricación de equipos que permitan el reciclaje a gran escala. Además, para realizar un proceso completo de reciclaje se requieren incorporar otros procesos, como el desmontaje del marco de aluminio y la caja de conexión y el secado y la separación de los productos obtenidos.

En un estudio similar, Song aplica este método a paneles de silicio bifaciales, concluyendo que el método también es eficaz y viable para este tipo de módulos [46].

6.1.2. Pang *et al.*, 2021

En su trabajo titulado “Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field” [29], Pang estudia y propone un nuevo método, fundamentado en el hinchamiento de la capa de EVA, para la delaminación de paneles fotovoltaicos. Como parte de la investigación se analizan diferentes parámetros para identificar aquellos que logran optimizar el proceso planteado.

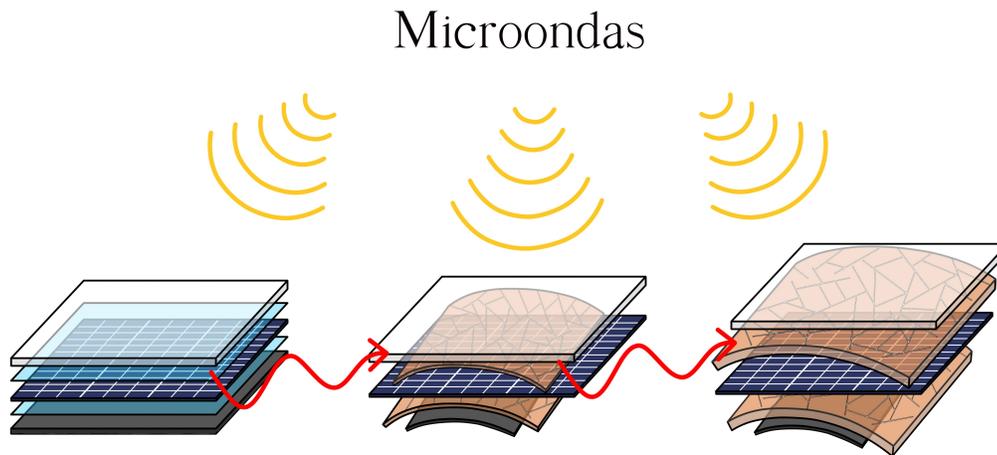


Figura 6.2: Mecanismo de hinchamiento mejorado por microondas [29].

La figura (6.2) ilustra como opera el mecanismo propuesto por Pang. En una primera etapa, el módulo debe ser sumergido en una solución de tricloroetileno que se encuentra expuesta a un campo de microondas y a un continuo aumento de temperatura. Debido al aumento de temperatura, las diferentes propiedades físicas y la expansión térmica de las distintas capas del módulo; se comienza a generar la delaminación y algunas de las capas se encorvan al mismo tiempo que la estabilidad del encapsulante disminuye y su micro estructura se rompe. Posteriormente, el solvente ingresa entre por las brechas generadas, hincha al encapsulante y lo disuelve, permitiendo así que se produzca la separación de las láminas del panel.

6.1.3. Li et al., 2022

En este estudio Li presenta y examina un método para recuperar hasta un 45 % del EVA de los encapsulantes de módulos fotovoltaicos.

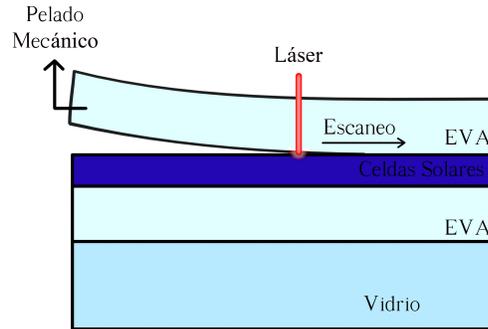


Figura 6.3: Proceso de irradiación láser y pelado mecánico [25].

El tratamiento utiliza un láser para irradiar la interfaz posterior entre la celda solar y el encapsulante. La naturaleza metálica del contacto trasero de la celda facilita la absorción de energía desde el láser y el consiguiente aumento de temperatura en la interfase. Con el aumento de temperatura se debilita la fuerza adhesiva del encapsulante, lo que permite que el eva posterior pueda ser extraído mecánicamente.

El mecanismo es propuesto como una alternativa a los métodos químicos y térmicos, debido a que su implementación podría evitar parte de los efectos medioambientales negativos que estos tratamientos generan. Además, esta técnica ofrece la oportunidad de reciclar parte del EVA y extraer de forma intacta a las celdas solares para su reutilización. Sin embargo, para que la técnica se pueda implementar a nivel industrial, aún se deben desarrollar maquinarias que sean capaces de integrar los procesos requeridos.

6.2. Empresas de reciclaje y reutilización de paneles

La siguiente es una recopilación de casos de empresas que realizan u ofrecen servicios y/o maquinarias para el reciclaje, reparación y reutilización de paneles fotovoltaicos:

6.2.1. First Solar

First Solar es una compañía que se dedica a la producción de paneles fotovoltaicos de cadmio telurio y ofrece soluciones integrales integrales para el manejo de módulos en el fin de su vida útil. De este modo, esta compañía cuenta con plantas de reciclaje de paneles fotovoltaicos de *CdTe* en Estados Unidos, Alemania, Malasia y Vietnam. Con estas plantas, First Solar es capaz de procesar los módulos que han sido desechados durante la fabricación, módulos que han fallado de forma temprana y cuentan con garantía, y módulos que han llegado al fin de su vida útil.

El proceso de reciclaje desarrollado por esta empresa le permite recuperar más del 90 % del material semiconductor para ser reusado en la fabricación de nuevos paneles y aproximadamente el 90 % del vidrio para ser utilizado en la manufactura de nuevos productos. La siguiente figura muestra el proceso de reciclaje desarrollado por First Solar:

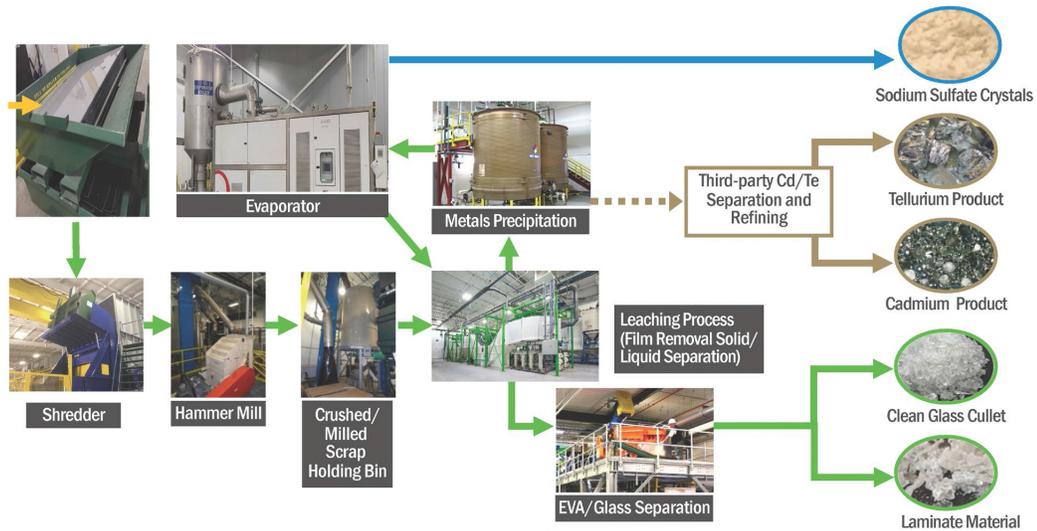


Figura 6.4: Proceso de reciclaje de First Solar [15].

El reciclaje comienza con un proceso de 2 etapas en el cual el módulo es triturado para obtener trozos de entre 4 [mm] y 5 [mm] para asegurar que el vidrio se separe del laminado. Luego, en un tambor de acero inoxidable que rota lentamente, se realiza el lixiviado de las capas semiconductoras mediante una mezcla de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Posteriormente, el tambor es vaciado lentamente en un clasificador de tipo tornillo donde se separan, por una parte el vidrio y el EVA, y por otra parte el líquido rico en cadmio y telurio. Después de esto, el fluido rico en metales es bombeado hacia una unidad de precipitación donde, a través de la adición de hidróxido de sodio (NaOH), se produce un aumento en el pH y la precipitación de los semiconductores. El precipitado resultante de este proceso es enviado a un tercero para la separación y refinamiento del cadmio y el telurio.

Por último, mediante un tamiz vibratorio, el vidrio es separado del EVA y es limpiado para eliminar los semiconductores residuales que podrían permanecer adheridos al cristal [13].

Además, todo este proceso de reciclaje es llevado a cabo bajo los mismos protocolos de salud y seguridad que First Solar utiliza para la producción de sus módulos fotovoltaicos. Esto, para proteger a los trabajadores de los efectos nocivos que puede generar el polvo de $CdTe$ para la salud [4].

6.2.2. Compton Industriale

Compton Industriale es una empresa italiana dedicada al diseño, desarrollo y venta de maquinarias innovadoras para el reciclaje de residuos. En este contexto, esta compañía ha desarrollado una línea de reciclaje semiautomática, denominada “Solar 4.0”, para el manejo de paneles fotovoltaicos.



Figura 6.5: Línea de reciclaje Solar 4.0 [7].

Los principales equipos y etapas de esta línea de reciclaje son [6]:

1. **Separador automático de marcos:** Este equipo utiliza 4 brazos hidráulicos para remover de forma automática los marcos de aluminio presentes en el panel.
2. **Cortadora de línea completa de banco:** Este dispositivo divide el panel fotovoltaico en dos partes, permitiendo así, incurrir en ahorros energéticos durante las sucesivas fases del proceso de reciclaje.
3. **Delaminador de vidrio:** Este equipo se encarga de delaminar y recuperar el vidrio de los módulos mediante un sistema de rulos contrapuestos y herramientas especiales que calibran la extracción del vidrio.
4. **Cinta transportadora para la descarga del vidrio:** Transporta el vidrio delaminado del panel. Además, cuenta con un sistema para eliminar eventuales partículas de hierro del vidrio y separar las fracciones de vidrio por debajo de 1 [mm].
5. **Cinta transportadora para los paneles delaminados:** Cinta que posee un largo de 3,2 [m] y se encarga de transportar los paneles desde el delaminador de vidrio hacia un triturador.
6. **Triturador de mono eje:** Tritura el panel delaminado, produciendo partículas con tamaños no superiores a los 10/15 [mm].
7. **Turbina de doble estadio:** Disgrega y divide el panel triturado en los materiales que lo componen. Diferencia el plástico del silicio y de los metales de conexión de las celdas. Con esto se obtiene una mezcla de plástico, silicio y metales.

8. **Sistema de cribado de 3 estadios:** Divide por tipología el material disgregado en el proceso anterior. Divide el polvo de silicio/vidrio, las conexiones en cobre-aluminio y el plástico.

Las características técnicas de esta línea de reciclaje se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6.1: Características técnicas de la línea de reciclaje Solar 4.0 [7].

Característica	Especificación
Dimensiones (A x L x h)	4,2 x 19,2 x 3,2 [m]
Potencia	120 [kW]
Voltaje	400 [V], Trifase
Peso	10 [t]
Ruido	78 [DB]
Capacidad productiva	30 - 50 [panel/h]

6.2.3. NPC Incorporated

NPC es una empresa con sede en Japón dedicada al negocio de la generación de energía solar. Por una parte, el sector de maquinaria de esta compañía abarca el desarrollo de equipo para la fabricación de módulos fotovoltaicos, máquinas de sellado de paneles de aislamiento al vacío y máquinas automatizadas. Análogamente, el sector medioambiental de NPC, se encuentra dedicado a ofrecer servicios y vender equipos de inspección y reciclaje de paneles solares.

En cuanto al proceso de reciclaje que ofrece la empresa para el reciclaje de paneles solares, este permiten recuperar la caja de conexión, el marco de aluminio, el laminado conformado por las celdas, el encapsulante y el protector trasero, y el vidrio. El esquema general de este proceso y de los materiales que se obtienen a partir de el, se resumen en la siguiente imagen:

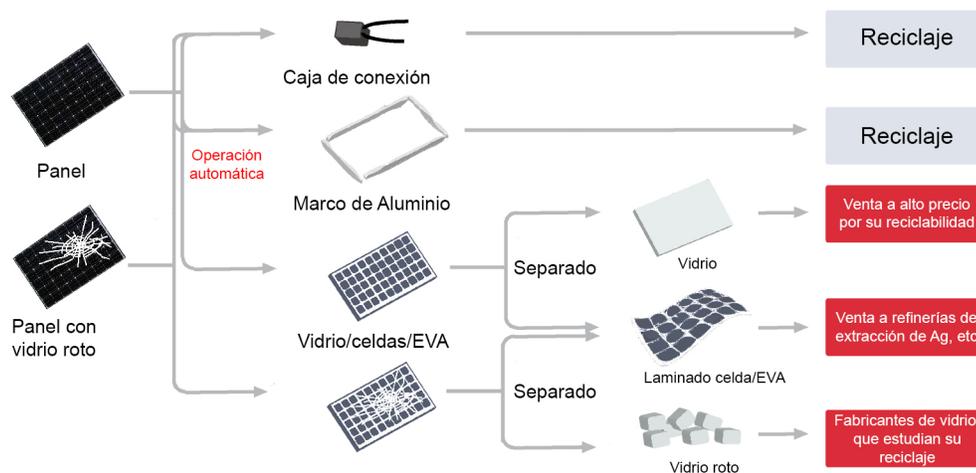


Figura 6.6: Proceso de reciclaje de NPC Incorporated [28].

En cuanto a los equipos, en primer lugar, la empresa cuenta con una máquina capaz de extraer la caja de conexión y el marco de aluminio. A continuación se muestra una imagen referencial de este equipo:



Figura 6.7: Separador semi automático del marco y de la caja de conexión [28].

Las características técnicas de este equipo y las especificaciones que deben cumplir los paneles para poder ser tratados en esta maquinaria, son:

Tabla 6.2: Características técnicas del separador semi automático [28].

Característica	Especificación
Dimensiones (A x L x h)	2.800 x 1.500 x 1.700 [mm]
Paneles tratables	Módulos con cubierta posterior
Dimensiones mín. de paneles	960 x 1.620 [mm]
Dimensiones máx. de paneles	1.000 x 2.000 [mm]
Espesor del vidrio del panel	2,8 - 4,0 [mm]
Grosor del marco del panel	30 - 60 [mm]
Tiempo de operación	Aprox. 40 [s]

En este mismo sentido, la compañía NPC ha desarrollado una línea de reciclaje de paneles fotovoltaicos que se encuentra compuesta por tres equipos; el primero de estos separa la caja de conexión, el segundo quita los marcos de aluminio y el tercero separa la lámina protectora de vidrio del resto del panel laminado.

La siguiente imagen muestra la línea de reciclaje desarrollada por NPC y los equipos que la componen:



Figura 6.8: Línea de reciclaje NPC [28].

El separador de vidrio es capaz de separar la lámina de vidrio de manera intacta utilizando la tecnología conocida como “Heated Blade”. Este método, desarrollado y patentado por NPC, consiste en introducir una cuchilla calentada a 300°C entre el vidrio y el material laminado para derretir el encapsulante y separarlo del vidrio.

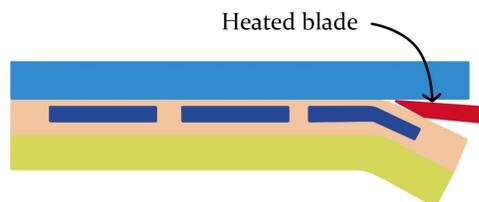


Figura 6.9: Método “Heated Blade” [28].

Las especificaciones de esta línea de reciclaje y las características que deben cumplir los módulos para poder ser procesados en esta maquinaria son:

Tabla 6.3: Características técnicas de la línea de reciclaje NPC [28].

Característica	Especificación
Dimensiones (A x L)	18,2 x 2,2 [m]
Paneles tratables	Módulos con cubierta posterior
Dimensiones mín. de paneles	800 x 800 [mm]
Dimensiones máx. de paneles	1.090 x 2.100 [mm]
Espesor del vidrio del panel	2,8 - 4,0 [mm]
Espesor del marco del panel	40 - 60 [mm]
Tiempo de operación	Aprox. 60 [s]
Interface	Pantalla touch

6.2.4. Suny Group

Suny Group es una compañía localizada en la zona de desarrollo industrial de Zhengzhou, China. Esta empresa se dedica a la fabricación, desarrollo, exportación y venta de maquinaria para el reciclaje de residuos sólidos.

De este modo, Suny Group ha desarrollado una línea de reciclaje de tres etapas que es capaz de recuperar el marco de aluminio, el vidrio, el cobre, el silicio y el plástico de los módulos fotovoltaicos. La primera y la segunda etapa consisten en el uso de maquinaria que es capaz de extraer el marco de aluminio y remover el vidrio.



(a) Removedor del marco de aluminio.



(b) Removedora de vidrio.

Figura 6.10: Maquinaria de Suny Group [47].

La tercera etapa de esta línea de reciclaje, consiste en una serie de maquinas que trituran y clasifican el resto de materiales. La siguiente figura muestra la disposición de los equipos utilizados en esta tercera etapa de reciclaje:

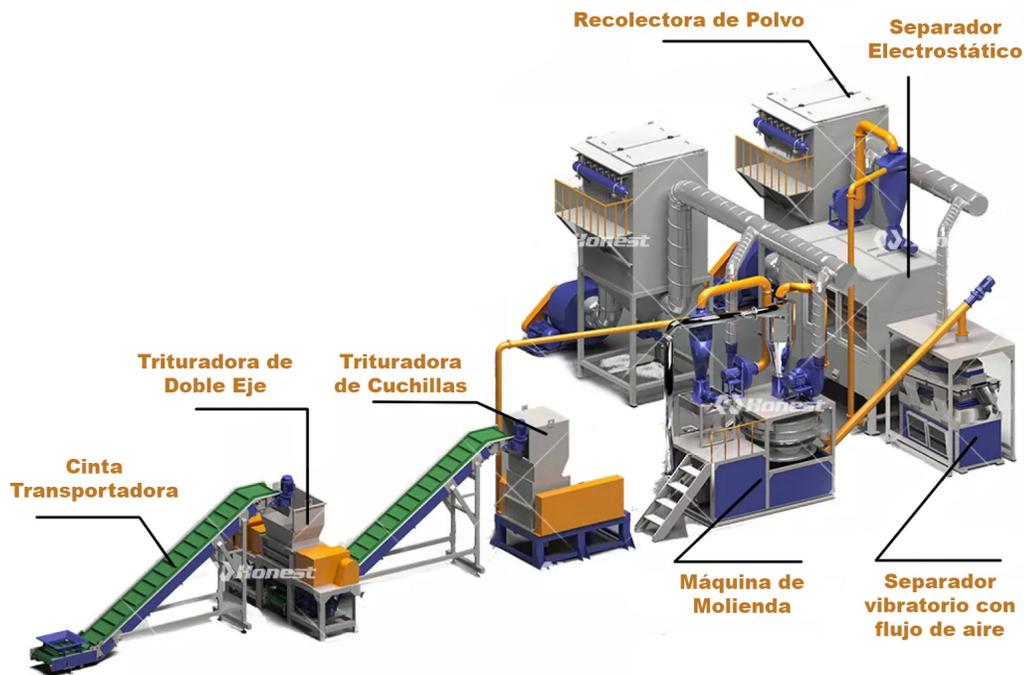


Figura 6.11: Trituradora y clasificadora de componentes de Suny Group [1].

De este modo, los principales equipos y procesos que conforman esta tercera parte de la línea de reciclaje son:

1. **Cinta transportadora:** El material laminado es transportado hacia la trituradora.
2. **Trituradora de doble eje:** Procesa el material hasta tiras de 50 [mm] de ancho y entre 10 a 20 [mm] de largo.
3. **Trituradora de cuchillas:** El material es procesado hasta tamaños de entre 1 a 1,5 [mm].
4. **Maquina de molienda:** El material es molido de forma uniforme, consiguiendo tamaños entre 15 a 20 veces más pequeños.
5. **Separador vibratorio con flujo de aire:** El cobre es separado del resto de los materiales.
6. **Separador electrostático:** Se separan los metales de los no metales.

La siguiente tabla muestra las principales características técnicas de la línea trituradora y clasificadora desarrollada por Suny Group:

Tabla 6.4: Características técnicas de la triturado y separadora de Suny Group [47].

Característica	Especificación
Dimensiones (A x L x h)	7 x 23 x 5 [m]
Potencia	194 [kW]
Peso	7 [t]
Capacidad productiva	500 [kg/h]

6.2.5. Fabtech Enterprises

Fabtech es una empresa estadounidense que ofrece soluciones para el reciclaje y reutilización de paneles para parques fotovoltaicos de gran escala. Esta compañía cuenta con centros de reciclaje en California, Utah, Colorado, Texas, Texas, Illinois, Ohio, Georgia, Carolina del Norte y Massachusetts.

Esta compañía ha desarrollado un proceso de distintas etapas que les permite seleccionar los tratamientos que requieren los módulos que reciben para otorgarles una segunda vida o ser tratados en procesos de reciclaje en caso de ser necesario. Las principales etapas de este proceso son:

1. Los paneles, ordenados y apilados en palets, son transportados hacia la planta de reciclaje.
2. A través de una inspección visual los paneles son separados y clasificados según el grado de deterioro y el nivel de reparación necesaria.
3. Se utiliza maquinaria especializada para lavar los paneles.

4. Los paneles se separan y clasifican entre los que serán reciclados y los que pueden ser reutilizados o reparados.
5. Se reparan los paneles dañados. Pueden repararse paneles con marcos doblados, cajas de conexión rotas o diodos defectuosos.
6. A través del “flash tester” (prueba de flash) se comprueba que los paneles reparados estén funcionando adecuadamente.
7. Los paneles que pueden ser revendidos son limpiados detalladamente y para posteriormente ser empaquetados.

Durante el año 2019, mediante este proceso, Fabtech logró reutilizar 201.958 paneles, obteniendo con ello una tasa de recuperación del 95 %.

6.2.6. SecondSol

Esta es una compañía alemana que se dedica principalmente al mercado de la compra y venta de productos fotovoltaicos. En este mismo sentido, esta empresa ofrece distintos servicios para el tratamiento de módulos fotovoltaicos han sido dados de baja. Particularmente, dentro de la gran cantidad de servicios que ofrece SecondSol, se encuentran la disposición, reciclaje y reparación de paneles solares.

Los paneles tratados por SecondSol pasan a través de un proceso general para identificar los tratamientos requeridos por el módulo. Este proceso cuenta de los siguientes pasos [49]:

1. Inspección de las mercancías de entrada, incluida la creación de un número de identificación.
2. Desembalaje de los módulos.
3. Inspección visual de daños (vidrios rotos, cables o caja de conexión).
4. Limpieza del módulo.
5. Reparación del módulo.
6. Prueba de aislamiento (ensayo de corriente de fugas en mojado) después de la reparación.
7. Ensayo de rendimiento (prueba de flash), incluyendo documentación de la información recolectada.
8. Reporte del módulo, incluyendo su categorización.
9. Embalaje del módulo, incluida la inspección de las mercancías salientes.

Con este proceso, SecondSol es capaz de poner a la venta módulos que han sido reparados o que aún continúan con condiciones que para ser utilizados en otro tipo de aplicaciones.

6.3. Selección de tecnologías y procesos

En primer lugar se decide que en la planta se llevarán a cabo tanto procesos de reciclaje como de reutilización de módulos solares. En particular, se decide no optar por la reparación debido a la falta de procesos establecidos o de una legislación que defina procedimientos para asegurar la seguridad y el correcto funcionamiento de los paneles restaurados.

Para decidir si los paneles serán reutilizados o reciclados, se les realizará una limpieza con agua seguida de una inspección visual que servirá como primer filtro. Si en esta revisión se determina que el panel tiene potencial para ser reutilizado, se continuará con la medición de sus parámetros y curvas características. Según estas mediciones se resolverá el destino del módulo.

Por otra parte, en base a los antecedentes presentados tanto en este como en los capítulos anteriores, se decide que se solo se tratarán paneles cristalinos unificiales, es decir, no se reciclarán módulos bifaciales ni de capa fina. Esto a causa de que, en primer lugar, se ha descartado el reciclaje de paneles de capa fina por los siguientes motivos:

- En el reciclaje de estos paneles se deben tomar mayores precauciones debido a la toxicidad de algunos de sus componentes. Por esta causa se requiere también de maquinaria especializada y dedicada a estos paneles.
- En Chile hay instalados alrededor de 1.930.000 módulos de capa fina, de los cuales aproximadamente el 88 % corresponden a paneles ubicados en el parque “Luz del Norte”. En particular, estos módulos fueron producidos por First Solar y en la declaración de impacto ambiental del parque solar se evalúa la posibilidad de que esta empresa se haga responsable del manejo de los paneles en el fin de su vida útil.

En cuanto al reciclaje de paneles de silicio cristalino, se determina que se utilizarán algunas de las maquinarias ofrecidas por las empresas Compton Industriale, NPC Incorporated y Suny Group. Estas decisiones se han tomado bajo las siguientes consideraciones:

- Muchos de los métodos que han sido investigados aún no se han probado a gran escala y requieren de mejoras para ser aplicados a nivel industrial.
- Los equipos ofrecidos por estas empresas son fáciles de operar y permiten recuperar la mayoría de los materiales del panel.

Se debe mencionar que, debido a las restricciones de los equipos seleccionados, esta decisión deja fuera el tratamiento de módulos bifaciales. Particularmente, las máquinas desarrolladas por estas empresas para dismantelar los marcos de aluminio, la caja de conexión y extraer la cubierta de vidrio no están diseñadas para operar con módulos de este tamaño y tampoco ofrecen una solución para tratar correctamente la cubierta posterior, que en estos paneles suelen ser de vidrio. Sin embargo, en muchos trabajos de investigación se han estudiado métodos que pueden ser aplicados a este tipo de módulos, además, debido al explosivo aumento en el uso de esta tecnología, las empresas están trabajando en el desarrollo de equipos y procesos para el reciclaje de estos paneles.

Sobre la elección de maquinaria, se determinó por escoger la línea de reciclaje de NPC incorporated ya que permite una mejor recuperación del vidrio. También, para tratar el resto del panel se utilizará la trituradora y clasificadora de componentes de Suny Group.

Con esto en consideración, la siguiente figura ilustra el flujo de los procesos que se desarrollarán en la planta de reciclaje:

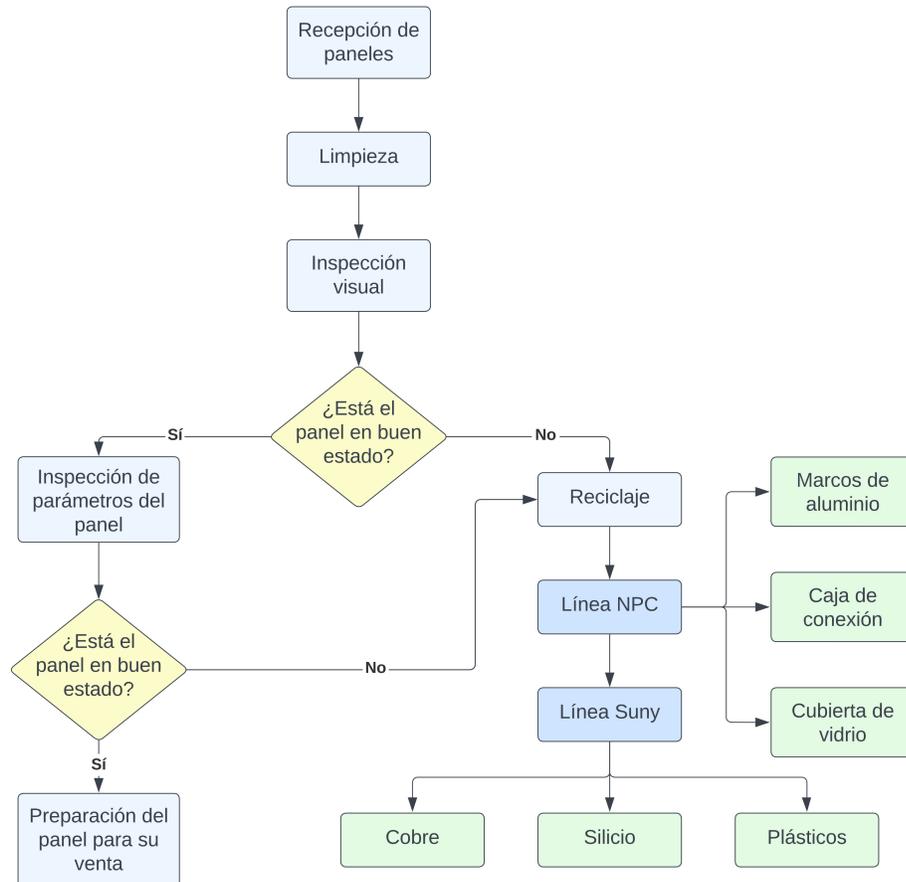


Figura 6.12: Diagrama de procesos seleccionados para la planta.

Capítulo 7

Diseño del layout de la planta

7.1. Capacidad de la planta

Para desarrollar el layout de la planta es necesario establecer la capacidad productiva que esta tendrá. Tal como se ha mencionado, se ha optado por que en la planta se reciclen paneles unifaciales de silicio cristalino y en base a los antecedentes recopilados, en Chile se encuentran instalados más de 14 millones de estos módulos. El escenario 1 planteado en el capítulo 5 se puede tomar como un caso conservador en cuanto al flujo de paneles que serán desechados en los próximos años. En estas circunstancias se contaría con un flujo promedio de 869.174 paneles de esta tecnología desinstalados cada año.

Tomando este panorama como referencia, se decide que la capacidad de tratamiento en la planta será de 315.000 [paneles/año], los que corresponden aproximadamente a un 35 % del flujo de paneles total.

7.2. Equipos e instalaciones

Para el desarrollo de las labores de reciclaje en la planta, se necesitarán principalmente, en base a la selección de tecnologías y procesos, de las líneas de reciclaje desarrolladas por NPC Incorporated y Suny Group. En base a la capacidad definida, las características técnicas de los equipos de reciclaje requeridos y considerando jornadas laborales de 8 horas al día; se calcula que se deberán utilizar 3 de los equipos ofrecidos por NPC Incorporated y 3 de los presentados por Suny Group. A su vez, con estos dispositivos la planta contará con una capacidad máxima para reciclar 345.600 [paneles/año].

Para realizar las operaciones en la planta de reciclaje, también serán necesarios equipos que permitan trasladar paneles fotovoltaicos entre instalaciones. Específicamente se ha considerando la necesidad de contar con los siguientes vehículos:

- **Grúa horquilla:** Se utilizarán para trasladar cantidades menores de paneles al interior de la planta.
- **Camión de carga liviana:** Al igual que la grúa horquilla será manipulada al interior del recinto, pero se usará para ocasiones que precisen el movimiento de una mayor cantidad de módulos.

- **Camión de carga pesada:** Serán usados para el transporte de grandes cantidades de paneles desde los parques fotovoltaicos hacia la planta de reciclaje.



(a) Camión de carga liviana.



(b) Grúa horquilla.



(c) Camión de carga pesada.

Figura 7.1: Vehículos a utilizar para el transporte de módulos.

Al interior de la zona de reciclaje también se utilizarán cintas transportadoras y transpaletas manuales para facilitar el movimiento de materiales. Adicionalmente se considerarán los siguientes equipos:

- **Probador de módulos:** Esta herramienta permitirá medir los parámetros y curvas características de los módulos. Según su capacidad de procesamiento se estima que se necesitarán 3 de estos equipos.
- **Granulador de cable:** Será empleada para procesar directamente en la planta los cables de cobre extraídos desde los módulos. Por la cantidad de material a tratar se necesitará solo uno de estos equipos.



(a) Probador de módulos.



(b) Granulador de cable.

Figura 7.2: Maquinaria de la planta de reciclaje.

Dentro del recinto se necesitarán además de ciertas edificaciones o zonas donde funcionar las distintas actividades fundamentales para el funcionamiento de la planta. Entre estos recintos se encuentran:

- **Bodega:** Necesaria para almacenar los paneles fotovoltaicos que serán tratados en la planta y los productos obtenidos del reciclaje. Se estima que deberá tener una superficie de 2.200 [m²] para llegar a albergar hasta el 25 % de la capacidad anual del centro de reciclaje.
- **Sector de reciclaje:** En este lugar se llevará a cabo el completo tratamiento de los módulos solares, es decir, su limpieza, medición de parámetros, clasificación y reciclaje.
- **Otras instalaciones:** Considera espacios para el desarrollo de actividades administrativas y necesarias para el transcurso de la jornada laboral. Contempla edificios como el comedor, baños y oficinas administrativos, además de espacios como estacionamientos y una zona de descarga para la bodega.

7.3. Layout

Para diseñar el layout de la planta se acomodaron los equipos e instalaciones de forma que se asegure un flujo continuo entre los diferentes procesos y se optimice el espacio utilizado. La siguiente figura muestra el bosquejo propuesto para el layout del recinto:

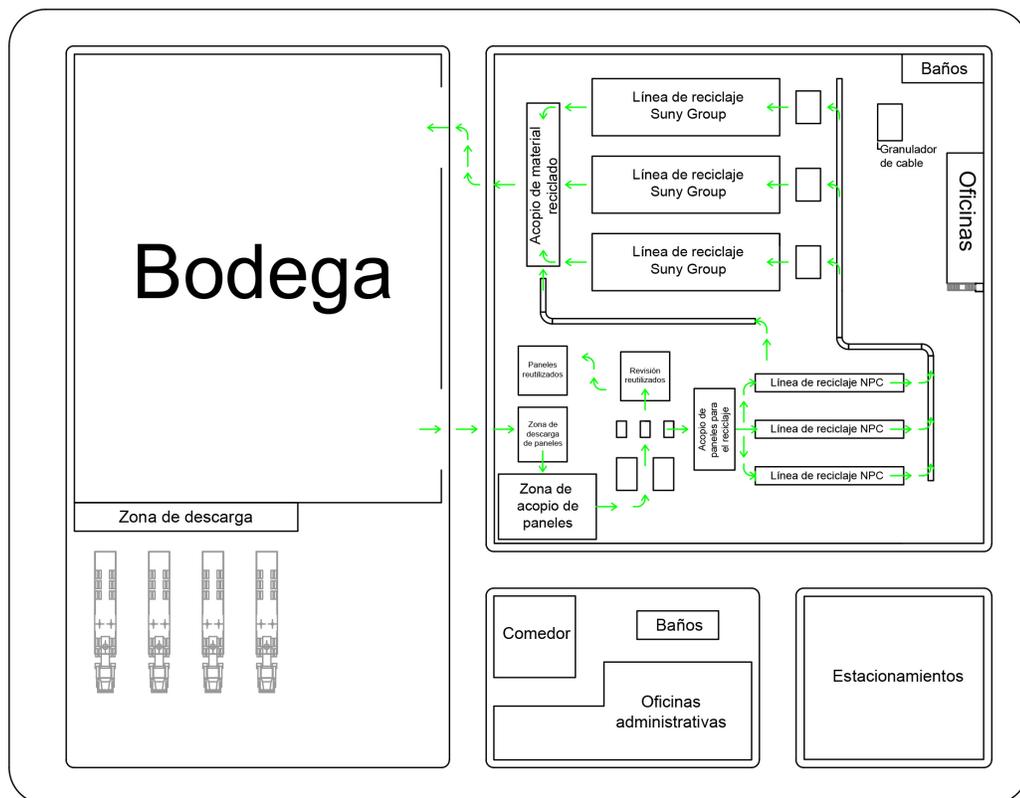


Figura 7.3: Layot propuesto para la planta de reciclaje.

Las flechas verdes representan el movimiento de paneles solares y materiales reciclados entre la bodega y la planta de reciclaje. La planta ocuparía una superficie de 12.200 [m²].

Capítulo 8

Ubicación de la planta

Para proponer una ubicación para el emplazamiento de la planta se consideró en un inicio que esta deberá encontrarse lo más cerca posible a los distintos parques fotovoltaicos cuyos tipos de paneles puedan ser tratados en el proceso de reciclaje.

Además de lo anterior, se consideró el hecho de que la planta deberá encontrarse más cerca de aquellos parques cuyos paneles puedan aportar mayor cantidad de masa para ser tratada en la planta. Por lo tanto, considerando estos aspectos, se optó por realizar un proceso de optimización con los siguientes pasos:

1. Se escoge una coordenada (latitud y longitud) aleatoria para representar la posición de la planta de reciclaje.
2. Se calculan las distancias entre la coordenada escogida para la planta y los distintos parques fotovoltaicos mediante la fórmula de Haversine:

$$d_i = 2 \cdot r \cdot \sin^{-1}(\sqrt{a}) \quad (8.1)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\phi_i - \phi_p}{2}\right) + \cos(\phi_i) \cdot \cos(\phi_p) \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_i - \lambda_p}{2}\right) \quad (8.2)$$

En donde:

- r : Radio de la tierra [km].
 - $\phi_{i,p}$: Latitud del i -ésimo parque fotovoltaico y de la planta de reciclaje respectivamente.
 - $\lambda_{i,p}$: Longitud del i -ésimo parque fotovoltaico y de la planta de reciclaje respectivamente.
3. Se calcula la distancia ponderada a los distintos campos fotovoltaicos, dando mayor importancia a aquellos que cuenten con mayor cantidad de masa por paneles instalados:

$$d = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot d_i \quad (8.3)$$

$$\alpha_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (8.4)$$

En donde:

- d_i : distancia entre la planta de reciclaje y el i -ésimo campo solar.
- p_i : masa del total de paneles instalados en el i -ésimo parque fotovoltaico.

4. Se obtienen la latitud y longitud óptima para instalar la planta fotovoltaica como aquellas que minimizan la distancia total ponderada calculada mediante la ecuación 8.3.

Utilizando este método, se obtuvieron las coordenadas óptimas, bajo estas condiciones, para instalar la planta de reciclaje considerando dos casos. Uno de ellos en el cual se consideran solo los parques que posean paneles de silicio policristalinos y monocristalinos bifaciales y un segundo caso en el que se consideran todos los parques que tengan paneles de silicio cristalino, tanto unificiales como bifaciales.

8.1. Caso 1: Paneles cristalinos unificiales

Al aplicar el método descrito para determinar una buena localización como para ubicar la planta de reciclaje de paneles cristalinos unificiales se obtuvieron como coordenadas la latitud $-26,244$ y la longitud $-70,038$. Este lugar se encuentra en la región de Atacama, al norte de la ciudad de Diego de Almagro.



Figura 8.1: Punto de ubicación propuesto para la planta en el caso 1.

Desde esta posición la planta de reciclaje se encontraría cercana y podría tratar los paneles instalados en los parques fotovoltaicos Almeйда, Malgarida, Javiera, Diego de Almagro Solar y Diego de Almagro entre otros.

Análogamente, el método fue aplicado a cada región de forma individual, considerando, por lo tanto, únicamente a los campos solares que se encuentran en la región considerada y que cuenten con tecnología de silicio cristalino unificial. La tabla que se encuentra a

continuación muestra los puntos obtenidos para cada una de las regiones que cuentan con este tipo de módulos instalados:

Tabla 8.1: Coordenadas propuestas para cada región, caso 1.

Región	Longitud	Latitud
Arica y Parinacota	-18,886	-70,113
Tarapacá	-20,811	-69,485
Antofagasta	-22,763	-69,512
Atacama	-27,163	-70,136
Coquimbo	-29,148	-70,877
Valparaíso	-32,764	-70,907
Metropolitana	-33,124	-70,825
Bernardo O'Higgins	-34,411	-71,091
Maule	-35,502	-71,581
Ñuble	-36,980	-71,744
Biobío	-37,069	-72,358

En estas coordenadas se podrían establecer zonas de acopio para los módulos fotovoltaicos de los parques solares cercanos.

8.2. Caso 2: Paneles cristalinos

Análogamente al caso anterior, al calcular las coordenadas propuestas para la planta de reciclaje, considerando las tecnologías de silicio cristalino, se obtuvieron la latitud -26,274 y la longitud -69,959.

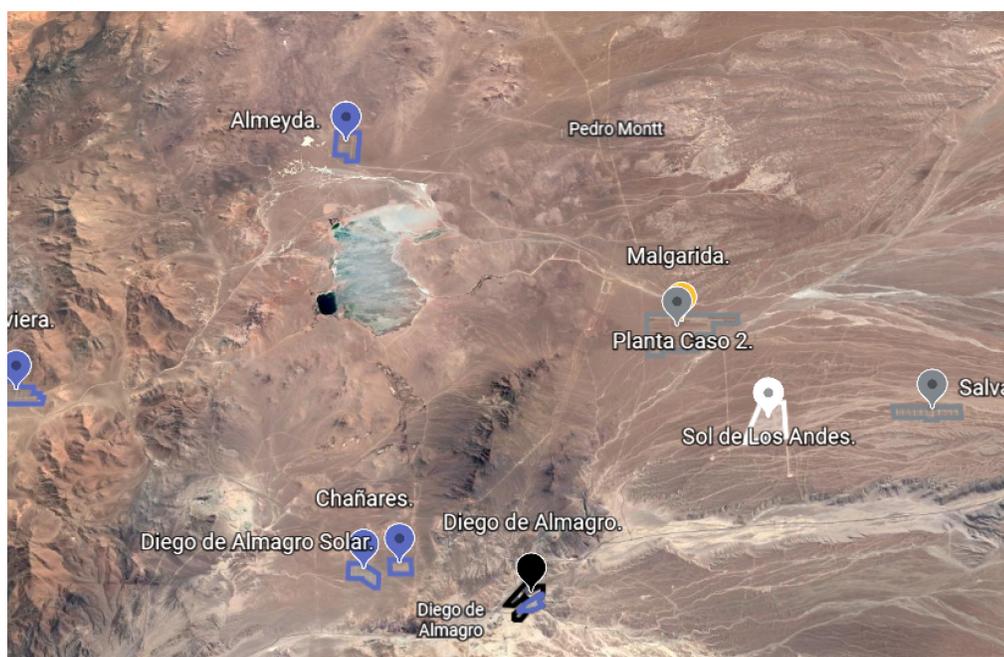


Figura 8.2: Punto de ubicación propuesto para la planta en el caso 2.

En este caso, la coordenada obtenida se encuentra aproximadamente a 8,5 [km] al sureste del punto obtenido para el caso anterior. Coincidiendo este lugar con la zona de emplazamiento del parque fotovoltaico Malgarida.

Similarmente al caso anterior, se obtuvieron las coordenadas para cada región del lugar óptimo para ubicar zonas de acopio de paneles. Las coordenadas obtenidas son:

Tabla 8.2: Coordenadas propuestas para cada región, caso 2.

Región	Longitud	Latitud
Arica y Parinacota	-18,886	-70,113
Tarapacá	-20,812	-69,484
Antofagasta	-22,591	-69,488
Atacama	-26,974	-69,972
Coquimbo	-29,148	-70,877
Valparaíso	-32,782	-70,916
Metropolitana	-33,127	-70,826
Bernardo O'Higgins	-34,418	-71,091
Maule	-35,605	-71,634
Ñuble	-36,865	-71,744
Biobío	-37,069	-72,358

Al comparar las coordenadas obtenidas como punto óptimo para ubicar la planta de reciclaje, tanto para el caso 1 como el caso 2, se puede apreciar que los puntos obtenidos se encuentran cercanos, por lo que una planta ubicada en el sector contaría con una excelente localización para estar cerca de parques con tecnologías cristalinas unificadas como con paneles cristalinos en general. Ahora bien, considerando factores como disponibilidad de mano de obra, acceso a servicios básicos y tamaño del mercado de rubros de interés para la empresa, una ubicación más cercana a la comuna de Diego de Almagro o inclusive en localidades más alejadas, como la comuna de Copiapó, podría resultar más provechoso para el desarrollo del proyecto.

En el mismo sentido, si se comparan las coordenadas mostradas en la tabla (8.1) con las de la tabla (8.2), se puede observar que en la mayoría de los casos estas ubicaciones se encuentran cercanas, por lo que es viable considerar las ubicaciones del caso 2 ante la posibilidad de que la planta de reciclaje pueda ampliar y/o renovar sus equipos para abarcar paneles bifaciales.

Capítulo 9

Evaluación económica

9.1. Ingresos

La principal fuente de ingresos de la planta corresponderá a la venta de los materiales obtenidos a partir del reciclaje. Para el cálculo de la cantidad anual de materiales reciclados y los ingresos asociados a la venta de estos se han tenido las siguientes consideraciones:

- De los 315.000 paneles que la planta tratará anualmente, solo un 93 % serán reciclados, el resto se supondrán como paneles que serán dispuestos para su reutilización.
- En base a la información recopilada sobre los módulos instalados en Chile, se considera que estos poseen un peso promedio de 23,8 [kg].
- Para el vidrio y el aluminio se considera una tasa de recuperación del 100 %, mientras que para el cobre y el silicio se supone una tasa del 95 %.
- Para los diferentes materiales recuperados se consideran ingresos según los precios de compra dados por diferentes empresas de reciclaje².

Con estos supuestos, se tendrá que la cantidad de materiales recuperados anualmente y los ingresos asociados a su venta serán:

Tabla 9.1: Ingresos por venta de materiales obtenidos a través del reciclaje.

Material	Cantidad [kg/año]	Precio [\$/kg]	Total [\$/año]
Vidrio	5.229.158	10	52.291.575
Aluminio	697.221	950	662.359.950
Cobre	52.989	4.500	238.449.582
Silicio	331.180	1.400	463.651.965
Total			1.416.753.072

² En el Anexo C se presentan las referencias utilizadas para establecer los precios de venta de los materiales obtenidos.

Otras fuentes de ingresos corresponderán al cobro por el servicio de reciclaje de paneles y a la venta en mercados de segunda mano de paneles que puedan ser reutilizados. Por una parte se supondrán ingresos de \$250 por panel reciclado, asimismo, se supondrá que los módulos reutilizados corresponderán al 7% de los paneles tratados anualmente. Igualmente, se asumirá que por cada panel reutilizado la planta percibirá ingresos iguales al 10% del valor comercial de un panel estándar nuevo. Con esto, los ingresos percibidos por estos aspectos serán:

Tabla 9.2: Ingresos por servicios de reciclaje y reutilización de paneles.

Tipo de Panel	Cantidad [nº/año]	Precio [\$]	Total [\$/año]
Reciclado	292.950	250	297.675.000
Reutilizado	22.050	13.500	212.625.000
Total			370.912.500

Bajo las consideraciones anteriores, la planta de reciclaje percibirá anualmente un ingreso total de \$ 1.787.665.572.

9.2. Inversión y costos

Parte de la inversión necesaria para el proyecto corresponde a los costos de la maquinaria y herramientas requeridas para la operación de la planta de reciclaje. Para aquellos equipos que requieran ser importados se consideró un cargo adicional del 20% al precio original para cubrir los costos de transporte e instalación. La siguiente tabla resume los costos por este concepto³:

Tabla 9.3: Inversión necesaria para la compra de equipos.

Equipo	Cantidad	Precio unitario [\$]	Total [\$]
Línea de reciclaje NPC	3	1.294.800.000	3.884.400.000
Línea de reciclaje Suny	3	192.207.360	576.622.080
Solar panel tester	3	16.944.000	50.832.000
Cinta transportadora, 1 [m]	75	1.217.520	91.314.000
Granulador de cable	1	8.219.604	8.219.604
Camión de carga liviana	2	40.783.680	81.567.360
Camión de carga pesada	4	81.490.000	325.960.000
Grúa horquilla	3	16.648.100	49.944.300
Transpaleta manual	4	321.300	1.285.200
Corta cables	4	13.800	55.200
Múltmetro digital	4	34.990	139.960
Cámara termográfica	4	419.990	1.679.960
Cepillo para limpieza	4	987.070	3.948.280
Total			5.075.967.944

³ En el Anexo C se presentan las referencias utilizadas para establecer el precio de estos equipos.

En cuanto al terreno, se tomará como suposición que este será arrendado y que se requerirán de distintas operaciones para prepararlo para el levantamiento de las instalaciones y su utilización. La tabla que se encuentra a continuación resume los costos generados por estas operaciones⁴:

Tabla 9.4: Costos por preparación del terreno e instalaciones.

Obra	Cantidad	Precio	Total [\\$]
Limpieza del terreno	12.500 [m ²]	614 [\$/m ²]	7.675.000
Relleno y nivelación	12.500 [m ²]	17.120 [\$/m ²]	215.125.000
Losas	6.615 [m ²]	131.407 [\$/m ²]	869.283.586
Pavimentación	5.590 [m ²]	1.409 [\$/m ²]	7.785.086
Muros de hormigón	72 [m ³]	147.075 [\$/m ³]	10.545.303
Tabiquería	96 [m ²]	18.960 [\$/m ²]	1.812.576
Muros de fachada ligera	6.160 [m ²]	37.780 [\$/m ²]	232.724.800
Total			1.345.041.352

Adicionalmente se consideró un 15% agregado al precio de los muros de hormigón para cubrir los costos por terminaciones. Igualmente se añade un 10% del total de obras para cubrir costos de instalaciones eléctricas y de agua. Con esto, el total para la construcción de las obras requeridas para la planta es de \$1.481.127.283 y la inversión inicial de \$6.557.095.227.

Parte de los costos asociados a la operación de la planta corresponderán al pago de los sueldos a los distintos funcionarios que serán requeridos para que el proyecto funcione correctamente. Los distintos cargos necesarios y el rol que cumplirán dentro de la planta serán:

- **Operarios de la línea de reciclaje NPC:** Serán los encargados de situar los paneles fotovoltaicos en la línea de reciclaje, recoger y apilar los marcos de aluminio, la caja de conexión y la cubierta de vidrio y enviar el resto del material laminado hacia la línea de reciclaje Suny.
- **Operarios de la línea de reciclaje Suny Group:** Deberán suministrar la línea de reciclaje con el material laminado y administrar los materiales obtenidos como producto del proceso de reciclaje de esta línea.
- **Evaluadores de paneles:** Su tarea será utilizar la inspección visual y los análisis pertinentes para determinar si los paneles se encuentran aptos para ser reutilizados o deben ser reciclados.

⁴ Costos de referencia en base a chile.generadordeprecios.info

- **Limpiadores de paneles:** Estarán encargados de limpiar los paneles para su posterior evaluación.
- **Operarios de la grúa horquilla:** Sus funciones contemplan el acopio y traslado de paneles y materiales reciclados dentro de la planta.
- **Conductores de camiones de carga liviana:** Estarán encargados de trasladar y gestionar la carga de camiones con paneles fotovoltaicos y materiales reciclados entre la bodega y el área de reciclaje.
- **Conductores de camiones de carga pesada:** Deberán realizar el movimiento de paneles desde los parques fotovoltaicos hacia la planta de reciclaje.
- **Bodegueros:** Su labor se centrará en gestionar el almacenamiento de los paneles fotovoltaicos y los productos obtenidos desde el reciclaje. También estarán encargados de llevar el control de inventarios y ordenar la distribución de los materiales al interior de la bodega.
- **Jefe de planta:** Será el encargado de gestionar y supervisar las operaciones en el área de reciclaje. Particularmente tendrá que dirigir y asignar tareas para asegurar el cumplimiento de las metas de producción.
- **Jefe de logística:** Sus tareas se centrarán principalmente en definir e implementar los procesos necesarios para asegurar el funcionamiento del proyecto. También deberá establecer y controlar el cumplimiento de objetivos de producción de la planta.
- **Gerente de ventas:** Sus funciones serán acordar y coordinar el tratamiento de módulos solares con parques fotovoltaicos y organizar la venta de los productos obtenidos.
- **Gerente general:** Principalmente estará a cargo de planificar, organizar y supervisar las actividades desarrolladas en la empresa. Igualmente, deberá administrar los recursos y liderar la toma de decisiones dentro de la empresa.
- **Recepcionista:** Dentro de sus funciones tendrá que brindar atención al personal que requiera información y apoyar en las actividades administrativas a través del control de las llamadas y correspondencia.

Además de estos puestos de trabajo, hay otros que también serán requeridos pero cuyos servicios podrían ser subcontratados. Aún así, los sueldos de este personal serán considerados cómo tales para el cálculo de los costos asociados al pago de remuneraciones. La tabla que se muestra a continuación resume la cantidad de personal requerido para cubrir estos puestos y los costos asociados al pago de sueldos:

Tabla 9.5: Costos mensuales por pago de sueldos al personal de la planta.

Cargo	Cantidad	Sueldo [\$]	Total [\$]
Operario línea NPC	4	650.000	2.600.000
Operario línea Suny	3	650.000	1.950.000
Evaluador de paneles	3	700.000	2.100.000
Limpiador de paneles	3	550.000	1.650.000
Operador grúa horquilla	2	600.000	1.200.000
Conductor	8	600.000	4.800.000
Bodeguero	2	550.000	1.100.000
Jefe de planta	1	1.200.000	1.200.000
Jefe de logística	1	1.500.000	1.500.000
Gerente general	1	2.000.000	2.000.000
Gerente de ventas	1	2.000.000	2.000.000
Recepcionista	1	550.000	550.000
Guardia de seguridad	2	550.000	550.000
Personal de aseo	3	500.000	1.500.000
Personal comedor	3	550.000	1.650.000
		Total	16.600.000

Para el cálculo del total anual se agrega un 20 % adicional para cubrir otros gastos asociados a los trabajadores. Así, el costo total anual por pago de remuneraciones es de \$239.040.000.

Adicionalmente la planta tendrá asociados costos debido a su propio funcionamiento. Los factores que contribuyen a estos gastos son:

- **Electricidad:** Gastos asociados al consumo eléctrico de las para la iluminación y funcionamiento de las instalaciones, considerando el consumo energético de las maquinarias.
- **Agua potable:** Pagos asociados al gasto de agua, tanto para su consumo como para satisfacer necesidades básicas de aseo e higiene personal, de los trabajadores de la planta. En base al decreto supremo n° 594 se calcula un consumo de 150 [L] diarios por persona.
- **Agua industrial:** Costos por el agua utilizada para el lavado de paneles. Se estima que se empleará 1 [L] por módulo.
- **Arriendo del sitio de emplazamiento.**
- **Desecho de plásticos:** Pagos por el desecho en rellenos sanitarios de materiales sin valor comercial u oportunidad de mercado.

La siguiente tabla recapitula los gastos operacionales del centro de reciclaje en el período de un mes⁵:

Tabla 9.6: Costos mensuales de operación de la planta.

Ítem	Cantidad		Costo		Total [\$]
Electricidad instalaciones	48.000	[kWh]	2,5	[\$/kWh]	120.000
Electricidad maquinaria	365.678	[kWh]	2,5	[\$/kWh]	914.194
Agua potable	114	[m ³]	1.290	[\$/m ³]	147.060
Agua industrial	26,25	[m ³]	340	[\$/m ³]	8.925
Arriendo	12.200	[m ²]	750	[\$/m ²]	9.150.000
Desecho de plásticos	54,6	[t]	60.000	[\$/t]	3.276.189
Total					13.616.368

Encima se consideran desembolsos por la mantención de los equipos como un 2,5 % anual de su costos de inversión.

Así, los costos anuales de la planta, valorando tanto pago de sueldos como costos operacionales, ascienden a un total de \$523.494.705. De manera adicional, cada 3 años se sumará un gasto adicional para costear inspecciones a las maquinarias y arreglos en caso de ser necesario; estos gastos se estiman como un 15 % del costo de inversión de los equipos.

9.3. Flujo de caja

Para realizar el flujo de caja⁶ del proyecto “Planta de reciclaje de paneles fotovoltaicos” se han tomado en cuenta las siguientes suposiciones:

- Se supondrá un flujo de paneles constantes, lo que se ve reflejado en costos e ingresos invariables durante el período de evaluación.
- Un horizonte de evaluación de 15 años, que es un período estándar para la evaluación de proyectos de largo plazo.
- La utilización de una tasa de descuento de un 12,5 %.
- La inversión inicial del proyecto será cubierta en un 40 % mediante un préstamo que será pagado en cuotas igual y contará con una tasa de interés de un 10 %.
- Se determina el capital de trabajo como los costos necesarios para que el proyecto pueda operar durante 4 meses.

⁵ Las referencias a los precios unitarios para los costos de operación se muestran en el Anexo C.

⁶ En el Anexo D se puede hallar el detalle del flujo de caja obtenido.

La figura de a continuación muestra el desarrollo del flujo de caja acumulado del proyecto durante el período de evaluación del proyecto:

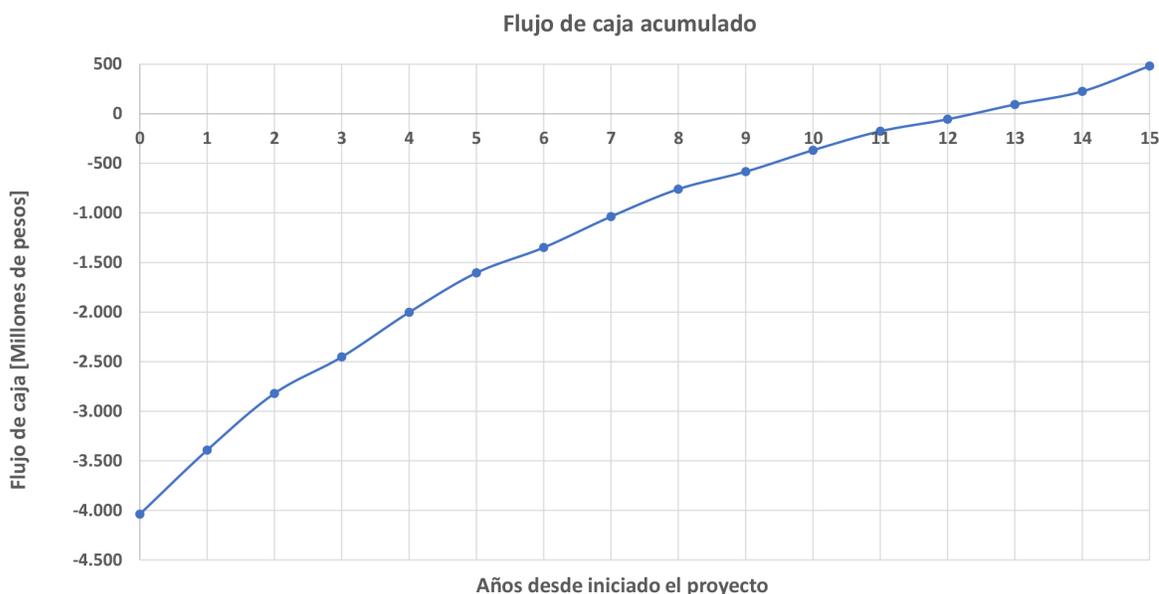


Figura 9.1: Flujo de caja acumulado del proyecto.

Es decir, bajo las consideraciones dadas, el proyecto resulta viable desde un punto de vista económico. Particularmente, al cabo de 15 años se obtiene un valor actual neto (VAN) de \$975.759.468, lo que indica que el proyecto, bajo las condiciones dadas, es rentable y puede realizarse. Por otra parte, la tasa interna de retorno (TIR) obtenida corresponde a un 16,8 %, lo que también corresponde a un indicador económico positivo, pese su cercanía con el valor de la tasa de descuento utilizada.

Por último, a partir del gráfico de la figura (9.1) se puede observar que solo se obtienen flujos de caja positivos a partir del año 10 desde iniciado el proyecto.

9.4. Análisis de sensibilidad

En esta parte se realiza una revisión de como diversos parámetros pueden influenciar en la viabilidad económica del proyecto. Concretamente se analiza de forma independiente como el cobro por el servicio de reciclaje, la productividad de la planta y el porcentaje de paneles reutilizados afectan al flujo de caja del proyecto.

9.4.1. Cobro por reciclaje

En este caso, para evaluar como afecta el cobro por panel reciclado a la rentabilidad del proyecto, se obtuvo el flujo de caja para casos en los que se recauden \$200, \$150 y \$100 por módulo tratado, manteniendo constantes la cantidad de paneles reciclados y reutilizados. La figura de a continuación muestra el desarrollo del flujo de caja para estos escenarios:

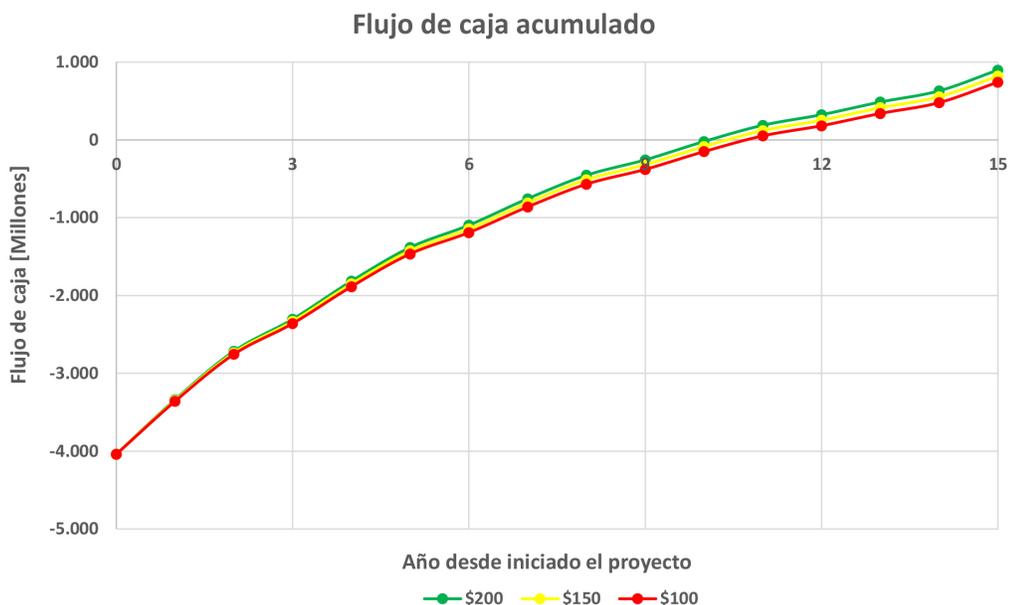


Figura 9.2: Flujos de caja acumulado para diferentes cobros por panel reciclado.

En el gráfico anterior es notable que, como era de esperar, mientras menos se cobre por panel fotovoltaico reciclado, menor será la rentabilidad del proyecto. Particularmente, a continuación se encuentran los índices económicos obtenidos bajo estos casos:

Tabla 9.7: Indicadores económicos para distintos cobros por panel reciclado.

Porcentaje	VAN [\$]	TIR [%]
200	898.035.215	16,5
150	820.310.962	16,1
100	742.586.708	15,8

Sin embargo, pese a esta tendencia, se puede comprobar que el cobro que se realice por panel reciclado no constituye un parámetro trascendental para la rentabilidad del proyecto. De hecho, si se mantienen la cantidad de paneles reciclados y reutilizados, se puede llegar a un caso límite en el cual no se perciban ingresos por el servicio de reciclaje en si mismo, y aún así la planta continuaría siendo rentable. Más aún, en tal caso se contaría con una TIR de un 15,1% y un VAN de \$587.138.202.

9.4.2. Porcentaje reutilizados

En el caso inicial se asumió que del total de los 315.000 paneles que la planta de reciclaje trataría anualmente, un 7% podría ser reutilizado. Para estudiar como la cantidad de paneles reutilizados puede afectar a la rentabilidad del proyecto, se calculan los parámetros económicos para distintos porcentajes de reutilización, manteniendo constante la cantidad de paneles tratados y el cobro por el servicio de reciclaje. Particularmente se calculan estos valores para porcentajes de reutilización de un 5%, 3% y 1%. La siguiente figura muestra el desarrollo del flujo de caja acumulado para estos casos:

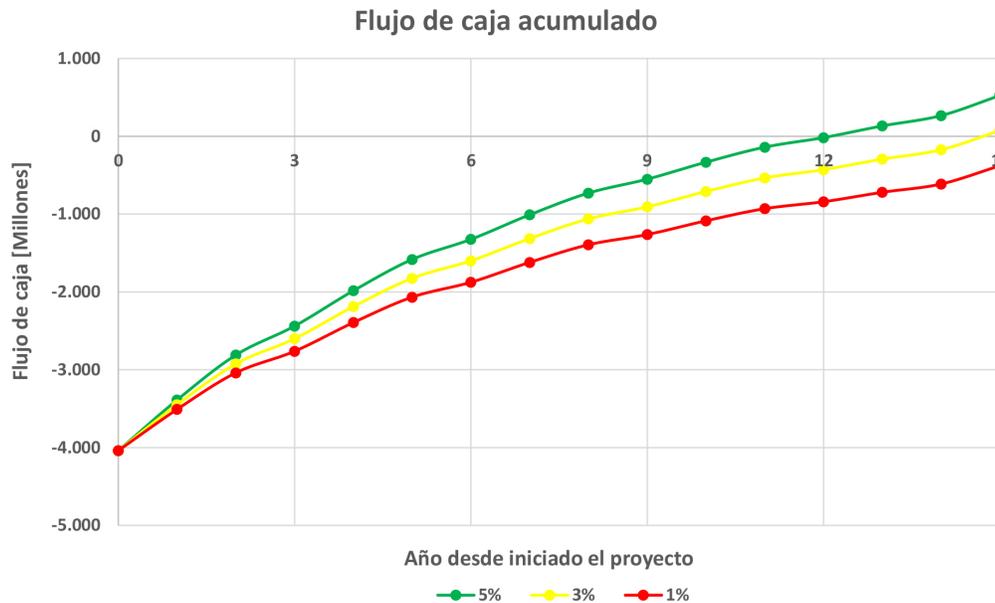


Figura 9.3: Flujo de caja acumulado para diferentes cantidades de paneles reutilizados.

En este gráfico se puede observar que el flujo de caja es afectado considerablemente por la cantidad de paneles reutilizados. Para ser más específico, en la tabla de a continuación se muestran los indicadores económicos del proyecto obtenidos para los distintos porcentajes de reutilización de paneles:

Tabla 9.8: Indicadores económicos para distintos porcentajes de reutilización.

Porcentaje	VAN [\$]	TIR [%]
5%	524.457.352	14,8
3%	73.155.236	12,8
1%	-378.146.880	10,8

Basándose en los valores obtenidos, se puede apreciar que la planta de reciclaje no será viable desde un punto de económico si no se logran reciclar paneles cierta cantidad de paneles. Específicamente, para porcentajes de reutilización menores a 2,7%, el proyecto no será rentable.

9.4.3. Producción de la planta

Otro parámetro que puede influir fuertemente en la rentabilidad del proyecto es la cantidad de paneles que son reciclados anualmente en la planta. Para ver como afecta este factor a la viabilidad económica, se obtiene el flujo de caja acumulado para distintos porcentajes de producción en la planta (90 %, 85 % y 80 %), considerando además constantes la cantidad de paneles reutilizados y el cobro por el servicio de reciclaje. A continuación se presenta el gráfico obtenido para estos casos:

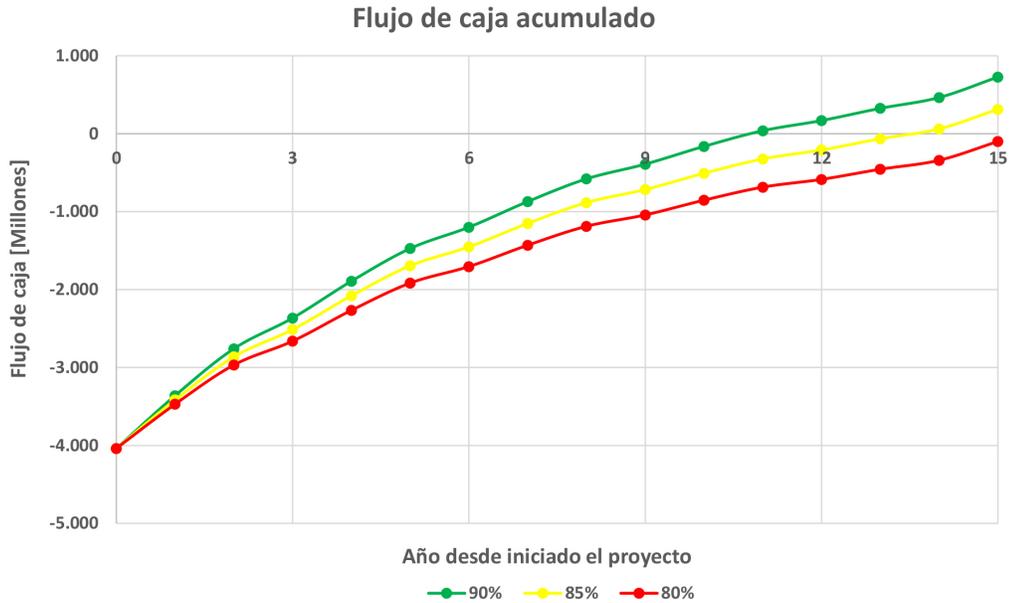


Figura 9.4: Flujo de caja acumulado para distintos porcentajes de paneles tratados.

Se puede apreciar que a medida que disminuye la cantidad de paneles reciclados en la planta, también disminuye el flujo de caja asociado al proyecto. De forma más específica la siguiente tabla contiene los indicadores económicos obtenidos para los distintos porcentajes de capacidad:

Tabla 9.9: Indicadores económicos para distintos porcentajes de reutilización.

Porcentaje	VAN [\$]	TIR [%]
90 %	727.619.719	15,7
85 %	314.053.469	13,9
80 %	-99.512.780	12,0

Ya para un 81 % de la capacidad se tienen indicadores que señalan que el proyecto no será rentable bajo estas circunstancias.

9.4.4. Caso crítico

Uno de los casos críticos para la rentabilidad del proyecto esta asociado con que la planta no cuente con paneles para reutilizar y el porcentaje de reciclaje sea menor al 100 % del flujo de diseño. Cómo se observa en la figura (9.3), si en la planta se reciclaran 315.000 paneles al año, con un cobro unitario por módulo reciclado de \$250 y no hubieran módulos para ser reutilizados, el proyecto no sería viable. Por esto, es esperable que si en el mismo contexto de no reutilización, la planta operara a menos del 100 % de su capacidad las pérdidas sean aún mayores.

Sin embargo, en un contexto como el descrito aún hay una opción para que la planta sea rentable. Esta opción consiste en aumentar el cobro por el servicio de reciclaje. Así, por ejemplo, el siguiente gráfico muestra el desarrollo del flujo de caja acumulado para distintos porcentajes de capacidad, sin reutilización y con el cobro de \$750 por panel reciclado:

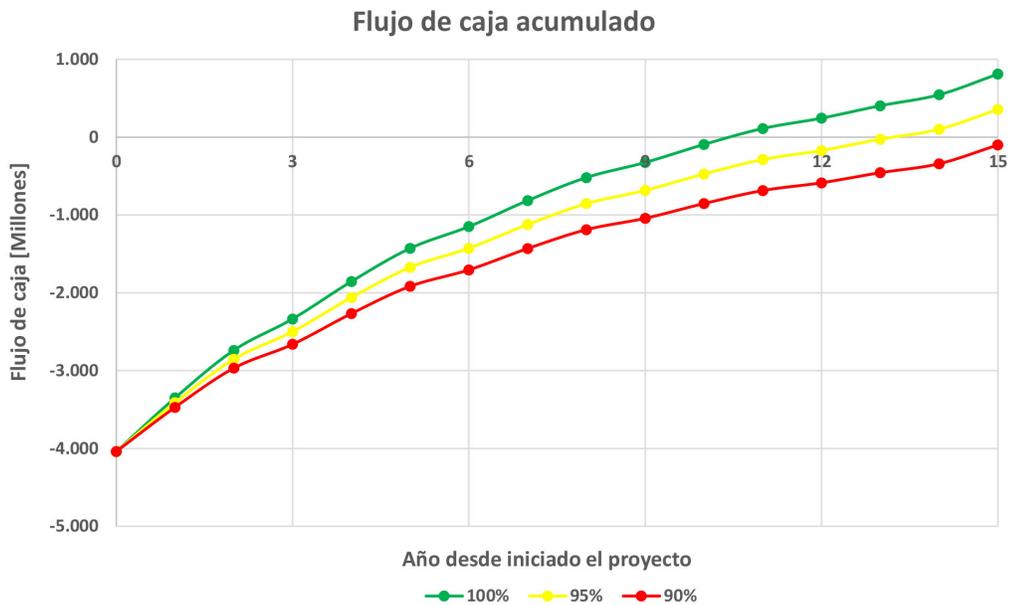


Figura 9.5: Flujo acumulado para diferentes capacidades en el caso sin reutilización y con una tarifa de \$750.

Con este panorama, el proyecto es viable si la planta opera hasta el 92 % de su capacidad. Similarmente, si se cobrarán \$1.000 por módulo reciclado, se podría operar hasta un con un 88 % de la condición de diseño y si la tarifa por panel fuera de \$1.500 se podría llegar hasta un 81 %.

9.5. Discusión de resultados

Los análisis realizados han comprobado que aunque la rentabilidad del proyecto se puede asegurar para distintos escenarios, esta dependerá fuertemente de la cantidad de paneles reciclados y reutilizados. Particularmente se ha mostrado que el proyecto no es viable en caso de que no se cuenten con porcentajes de alrededor de un 2 % de paneles reutilizados a menos que se aumenten los cobros por el servicio de reciclaje de los paneles. Asimismo, es fundamental asegurar que la planta reciba flujos de paneles por sobre el 90 % de la capacidad productiva de la planta, pues de caso contrario se requieren de cobros mayores por el servicio de reciclaje para alcanzar flujos de caja positivos.

Por esta razón en el modelo de negocios del proyecto se debe considerar fomentar que los paneles lleguen en buenas condiciones y en grandes cantidades. Así, por una parte, una forma de promover que lleguen paneles en buenas condiciones, podría ser que desde la planta se pague a los titulares de parques solares que ofrezcan paneles en condiciones óptimas para su reutilización. Por otro lado, para intentar garantizar la capacidad productiva de la planta, se pueden establecer costos por el servicio de reciclaje en función de la cantidad de módulos entregadas. Asimismo, resultará fundamental realizar asociaciones con los titulares de parques fotovoltaicos para tratar sus módulos cuando estos realicen recambios o bien sus paneles lleguen al fin de su vida útil.

Capítulo 10

Conclusiones

La revisión de la situación de los parques fotovoltaicos Chilenos ha permitido crear una base de datos para caracterizar la distribución de campos solares, paneles y potencia instalada en el país. Se ha observado que la gran cantidad de parques fotovoltaicos, potencia y paneles se ubican en las regiones de Antofagasta y Atacama, lo que se explica debido a las condiciones favorables con las que estas regiones cuentan para la generación de energía solar fotovoltaica. Asimismo, se ha evidenciado que si bien hoy en día la mayor cantidad de paneles fotovoltaicos se basan en tecnologías de silicio policristalino unifacial, en los últimos años ha habido una tendencia a optar por paneles monocristalinos, especialmente por monocristalinos bifaciales.

Se han logrado establecer escenarios para estimar la generación de desechos debido al fin de la vida útil de paneles fotovoltaicos. En escenarios conservadores los paneles podrían comenzar a desmantelarse a partir de 2036 llegando a generar máximos de cerca de 120.000 toneladas de paneles en un año. En otro tipo de escenario, que plantea que el desmantelamiento ocurra de forma acelerada incentivado por factores económicos, la generación de residuos ocurriría a partir de 2030 y se podrían generar máximos de hasta 160.000 toneladas desechadas durante un año.

Mediante la revisión de procesos de reciclaje se han identificado tratamientos para recuperar distintos materiales y se han encontrado procesos de reciclaje que permiten tratar a las distintas tecnologías de módulos solares presentes en el país. Basándose en la distribución de tecnologías por panel fotovoltaico en Chile y en facilidad para implementar los procesos de reciclaje revisados, se concluye que la mejor opción es utilizar las líneas de reciclaje ofrecidas por empresas dedicadas al desarrollo de equipos y maquinaria, aún cuando debido a sus limitaciones no permitan tratar paneles monocristalinos bifaciales, los que constituyen una parte importante del total de paneles instalados en Chile.

De este modo, por la factibilidad técnica se decide además que se evaluará la reutilización de los paneles que lleguen a la planta y aquellos que no puedan ser reutilizados serán reciclados mediante las líneas de reciclaje de NPC Incorporates y Suny Group. Permitiendo recuperar vidrio, aluminio, cobre, silicio y plásticos. De estos materiales, el plástico no se considerará con valor comercial por lo que será desechado, del resto de materiales, todos a excepción del silicio pueden ser fácilmente vendidos en el mercado del reciclaje. Por parte del silicio, el mercado del reciclaje es más reducido pero puede ser vendido a refinerías y en un futuro se podría

abrir un nuevo mercado para la venta de silicio reciclado para la fabricación de nuevas celdas.

Usando el escenario conservador para la generación de residuos se establece una capacidad productiva para la planta de reciclaje, lo que permite dimensionar y diseñar un layout en base a la selección de procesos y equipos, considerando además una bodega e instalaciones administrativas.

Posteriormente, con el uso de los datos recopilados se propone que una buena ubicación para posicionar a la planta de reciclaje se encuentra en la región de Atacama, ya que aseguraría que la planta se encuentre cerca de los parques que pueden aportar mayores cantidades de paneles para su reciclaje. La ubicación obtenida es también consistente con encontrarse en una de las regiones con mayor cantidad de paneles instalados.

Por último la evaluación económica para el caso base permite concluir que el proyecto es rentable. Aunque también se ha comprobado que es sensible a la cantidad de paneles reutilizados y reciclados en la planta, por lo que se debe establecer un modelo de negocio que pueda suplir estas debilidades y que asegure la rentabilidad del proyecto frente a diferentes escenarios.

Con todo esto se puede concluir que el proyecto es viable tanto desde un punto de vista técnico como económico, dado que los procesos escogidos son de fácil implementación a nivel industrial y permiten recuperar materiales con valor comercial en la industria del reciclaje. Además, la venta de estos materiales, en conjunto con la reutilización de paneles en mercados de segunda mano y el cobro por el servicio de reciclaje pueden asegurar la rentabilidad del proyecto.

Bibliografía

- [1] Alibaba. (2022). *New Technology Solar Panels Recycling Plant Photovoltaic Cell Crushing Separating Machine Solar Chip Recycling Equipment*. Recuperado el 10 de diciembre de 2022 de https://www.alibaba.com/product-detail/New-Technology-Solar-Panels-Recycling-Plant_1600578185133.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.2.2bf62cf3IgaBoI
- [2] Beaucarne, G., Eder, G., Jadot, E., Voronko, Y., & Mühleisen, W. (octubre, 2021). *Repair and preventive maintenance of photovoltaic modules with degrading backsheets using flowable silicone sealant*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol(30), 1045–1053. <https://doi.org/10.1002/pip.3492>
- [3] Biblioteca del Congreso Nacional. (2019). *Responsabilidad Extendida del Productor: Estado de avance de Ley REP*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27476/1/REP_2019_FINAL.pdf
- [4] Centro Nacional de Energías Renovables & Fundación Chile. (2013). *Tecnología Fotovoltaica de CdTe de First Solar: Evaluación Medioambiental, de Salud y Seguridad*. https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/ES-First-Solar-Peer-Review-CENER_FCh_Espanol_Informe_Final.aspx
- [5] Chaverra Padilla, A. (2021). *Estrategias de aprovechamiento de residuos sólidos producidos por las celdas fotovoltaicas en el aprovechamiento de la energía solar en proyectos de producción más limpia en Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8736/1/50632-2021-2-GA.pdf>
- [6] Compton Industriale. (s.f.). *Datos del proyecto: Planta para reciclaje de paneles fotovoltaicos Solar 4.0*. <https://www.iber-recycling.com/wp-content/uploads/2022/07/DESCRIPCION-PLANTA-PARA-RECICLAJE-DE-PANELES-FOTOVOLTAICOS.pdf>
- [7] Compton Industriale. (s.f.). *Solar 4.0: Line for the recovery and recycling of photovoltaic panels*. <https://www.compton-industriale.it/files/Brochure-SOLAR-4.0.pdf>
- [8] Coordinador Eléctrico Nacional. (2022). *Reporte Energético Agosto 2022*. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/08/CEN-Reporte-Energetico-SEN-ago22.pdf>
- [9] D’Adamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (junio, 2017). *Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules*. En *International Journal of Photoenergy*, vol(2017), 1–6. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>
- [10] Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. (diciembre, 2022). *Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes*. En *Resources, Conservation and Recycling Vol(187)*, 106612. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612>
- [11] Dias, P. R., Schmidt, L., Chang, N. L., Monteiro Lunardi, M., Deng, R., Trigger, B.,

- Bonan Gomes, L., Egan, R., & Veit, H. (noviembre, 2022). *High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment*. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol(169), 112900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112900>
- [12] El-Khawad, L., Bartkowiak, D., & Kümmerer, K. (octubre, 2022). *Improving the end-of-life management of solar panels in Germany*. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol(168), 112678. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112678>
- [13] Escuela Romero, J. (2017). *Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos* [Tesis de pregrado, Universidad de La Laguna]. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5835>
- [14] First Solar. (2012). *First Solar FS Series 3TM PV Module*. <https://lm8solar.com/wp-content/uploads/2018/05/PV-Module-First-Solar-FS-387-LM8-Solar.pdf>
- [15] First Solar. (2022). *Sustainability report 2022*. https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/FirstSolar_Sustainability-Report_2022.ashx
- [16] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2022). *Press Release: PERC Solar Cells from 100 Percent Recycled Silicon*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/solar-cells-from-recycled-silicon.html>
- [17] Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (abril, 2014). *Recycling of photovoltaic panels by physical operations*. En *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol(123), 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>
- [18] In-Data & Rigk. (2020). *Informe 1: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil*. https://acesol.cl/images/noticias/noticias-2021/Informe-1_Tratamiento-Modulos-FV.pdf
- [19] In-Data & Rigk. (2020). *Informe 2: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil*. <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/2-Informe-2.pdf>
- [20] In-Data & Rigk. (2020). *Informe 3: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil*. <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/3-Informe-3.pdf>
- [21] Jinko Solar. (s.f.). *Swan Bifacial HC 72M 385-405 Watt: Monocrystalline Module*. [https://www.jinkosolar.com/uploads/5ed73333/SWAN%20JKM385-405M-72H-TV-A3,1\(2\)-EN-F30.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ed73333/SWAN%20JKM385-405M-72H-TV-A3,1(2)-EN-F30.pdf)
- [22] Jordan, D. C., Kurtz, S. R., VanSant, K., & Newmiller, J. (febrero, 2016). *Compendium of photovoltaic degradation rates*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol (24), 978–989. <https://doi.org/10.1002/pip.2744>
- [23] Kim, J., Rabelo, M., Padi, S. P., Yousuf, H., Cho, E.-C., & Yi, J. (julio, 2021). *A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy*. En *Energies*, vol(14), 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>
- [24] Lee, J.-K., Lee, J.-S., Ahn, Y.-S., Kang, G.-H., Song, H.-E., Kang, M.-G., Kim, Y.-H., & Cho, C.-H. (noviembre, 2017). *Simple pretreatment processes for successful reclamation and remanufacturing of crystalline silicon solar cells*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol(26), 179–187. <https://doi.org/10.1002/pip.2963>

- [25] Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. (enero, 2022). *Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling*. En *Waste Management*, Vol(137), 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.024>
- [26] Longi Solar. (s.f). *LR6-72PH 360~380M: Hi-MO1 High Efficiency Low LID Mono Perc Technology (1500V Compatible)*. <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/92nx8li8xr/5b68f93a7edd4.pdf>
- [27] Maani, T., Celik, I., Heben, M. J., Ellingson, R. J. & Apul, D. (septiembre, 2020). *Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels*. En *Science of The Total Environment*, vol(735), 138827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>
- [28] NPC incorporated. (s.f). *Automated Solar Panel Disassembly Equipment/Line*. Recuperado el 21 de diciembre de 2022 de <https://www.npcgroup.net/eng/solarpower/reuse-recycle/dismantling>
- [29] Pang, S., Yan, Y., Wang, Z., Wang, D., Li, S., Ma, W., & Wei, K. (septiembre, 2021). *Enhanced separation of different layers in photovoltaic panel by microwave field*. En *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol(230), 111213. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111213>
- [30] Peplow, M. (marzo, 2022). *Solar Panels Face Recycling Challenge*. En *ACS Central Science*, vol(8), 299-302. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.2c00214>
- [31] Perpiñan Lamigueiro, O. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>
- [32] Prasad, D. S., Sanjana, B., Kiran, D. S., Srinivasa Kumar, P. P., & Ratheesh, R. (septiembre, 2022). *Process optimization studies of essential parameters in the organic solvent method for the recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules*. En *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol(245), 111850. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111850>
- [33] Rahman, M. M., Mateti, S., Sultana, I., Hou, C., Falin, A., Cizek, P., Glushenkov, A. M., & Chen, Y. (mayo, 2021). *End-of-Life Photovoltaic Recycled Silicon: A Sustainable Circular Materials Source for Electronic Industries*. En *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol(2), 2100081. <https://doi.org/10.1002/aesr.202100081>
- [34] ReneSola. (2013). *Módulo Virtus II, 250W, 255W, 260W*. <https://www.tiendasolar.mx/attachments/article/51/virtusII%20%20250w-260w.%20ES.pdf>
- [35] Romero Campos, J. (2019). *Análisis ciclo de vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174091>
- [36] Rosas Mayorga, I. (2022). *Modelo de proyección de residuos fotovoltaicos y opciones de uso para su revalorización* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187251>
- [37] Sandoval Tapia, V. (2019). *Proyecto de evaluación técnico y económica de la implementación de un proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos en desuso o falla* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/49708>

- [38] Servicio de Evaluación Ambiental. (2017). *Guía para la descripción de proyectos de centrales solares de generación de energía eléctrica en el SEIA*. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2018/03/14/guia_centrales_solares_web_180314_new.pdf
- [39] Shin, J., Park, J., & Park, N. (abril, 2017). *A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers*. En *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol(162), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038>
- [40] Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R. & Zeman, M. (2015). *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT Cambridge Ltd.
- [41] Sodhi, M., Banaszek, L., Magee, C., & Rivero-Hudec, M. (2022). *Economic Lifetimes of Solar Panels*. En *Procedia CIRP*, vol(105), 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.130>
- [42] Solar Energy Industries Association. (2022). *Photovoltaics*. Recuperado el 23 de agosto de 2022 de <https://seia.org/initiatives/photovoltaics>
- [43] SolarWorld. (2011). *Energy for you and me: How we make solar panels to harness the sun's abundant power*. <https://www.akamaienergyhawaii.com/dimages/17118/solar-101-eng-solar-photovoltaic.pdf>
- [44] SolarWorld. (s.f.). *Calculating the additional energy yield of bifacial solar modules*. <https://solaren-power.com/pdf/Calculating-Additional-Energy-Yield-Through-Bifacial-Solar-Technology.pdf>
- [45] Song, B.-P., Zhang, M.-Y., Fan, Y., Jiang, L., Kang, J., Gou, T.-T., Zhang, C.-L., Yang, N., Zhang, G.-J., & Zhou, X. (enero, 2020). *Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation*. En *Waste Management*, Vol(101), 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.015>
- [46] Song, B.-P., Zhang, M.-Y., Fan, Y., Jiang, L., Kang, J., Gou, T.-T., Zhang, C.-L., Yang, N., Zhang, G.-J., & Zhou, X. (diciembre, 2020). *End-of-life management of bifacial solar panels using high-voltage fragmentation as pretreatment approach*. En *Journal of Cleaner Production*, vol(276), 124212. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124212>
- [47] Suny Group. (2022). *Scrap PV Solar Panel Recycling Plant*. Recuperado el 08 de diciembre de 2022 de <https://www.sunyrecycle.com/Scrap-PV-Solar-Panel-Recycling-Plant/>
- [48] Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B., Butler, E., Sinha, P., Corkish, R., Wambach, K., & Simon, E. S. (julio, 2020). *Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol(28), 1077–1088. <https://doi.org/10.1002/pip.3316>
- [49] Tsanakas, J. A., Heide, A., Radavičius, T., Denafas, J., Lemaire, E., Wang, K., Poortmans, J., & Voroshazi, E. (septiembre, 2019). *Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and recertification*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol(28), 454–464. <https://doi.org/10.1002/pip.3193>
- [50] Van der Heide, A., Tous, L., Wambach, K., Poortmans, J., Clyncke, J., & Voroshazi, E. (octubre, 2021). *Towards a successful re-use of decommissioned photovoltaic modules*. En *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol(30), 910–920. <https://doi.org/10.1002/pip.3416>

[i.org/10.1002/pip.3490](https://doi.org/10.1002/pip.3490)

- [51] Voronko, Y., Eder, G. C., Breitwieser, C., Mühleisen, W., Neumaier, L., Feldbacher, S., Oreski, G., & Lenck, N. (junio, 2021). *Repair options for PV modules with cracked backsheets*. En *Energy Science & Engineering*, vol(9), 1583–1595. <https://doi.org/10.1002/ese3.936>
- [52] Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., & Geng, C. (diciembre, 2022). *A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology*. En *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol(248), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976>
- [53] Yu, H. F., Hasanuzzaman, Md., Rahim, N. A., Amin, N., & Nor Adzman, N. (julio, 2022). *Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review*. En *Sustainability*, vol(14), 8567. <https://doi.org/10.3390/su14148567>

Anexos

Anexo A. Parques fotovoltaicos en Chile

La recopilación de los datos de los parques fotovoltaicos en Chile se llevó a cabo a través de distintas fuentes de información. Específicamente, los medios utilizados para la recopilación de datos fueron:

- **Comisión nacional de energía:** Mediante su reporte de capacidad instalada para generación se obtuvieron datos como nombres, años de puesta en servicio y potencia instalada de los parques fotovoltaicos.
- **Páginas webs asociadas:** Se utilizó material audiovisual o información directa otorgada por empresas titulares o asociadas a los diferentes campos solares, para adquirir datos como el tipo, cantidad y peso de los paneles.
- **Servicio de evaluación ambiental:** Mediante las declaraciones de impacto ambiental y las consultas de pertinencia de los parques, se consiguió información como la vida útil de los campos solares, el tipo, la cantidad y el peso de los paneles y referencias sobre la ubicación de los parques.
- **Google Earth:** Se utilizó esta plataforma para identificar las coordenadas de un punto que caracterice la ubicación de cada parque⁷.
- **Suposiciones:** Se realizaron supuestos en base a los antecedentes recopilados en los casos para los cuales faltase información.

Para identificar la fuente desde donde se obtuvo la información para cada parque solar, se utilizó el siguiente código de colores:

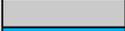
Código de colores obtención de información	
	DIA's y adendas correspondientes.
	Material audiovisual de empresas relacionadas.
	Reporte de capacidad instalada CNE.
	Consultas de pertinencia.
	Suposiciones en base a información recopilada.
	Noticia en página web u otro material.

Figura A.1: Código de colores utilizado para las fuentes de la información.

⁷ En el anexo B se encuentran más detalles respecto a la identificación de la ubicación de los parques solares.

A continuación se muestran los datos recopilados para el parque solar Pampa Camarones, que corresponde a único parque solar identificado en la región de Arica y Parinacota:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Pampa Camarones	6,2	2016	30	Psi	23.000	29,0	-18,886	-70,113

Figura A.2: Información de los parques solares ubicados en la región de Arica y Parinacota.

La figura que se encuentra a continuación presenta la información recopilada para los 8 parques fotovoltaicos identificados en la región de Tarapacá:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Atacama Solar II	170,7	2021	30	Msi	500.000	22,5	-20,507	-69,455
Granja Solar	105,0	2020	30	Msi	332.456	22,5	-20,812	-69,484
Huatacondo	89,5	2019	20	Psi	365.000	26,5	-21,143	-69,468
Huayca II	26,7	2018	30	Psi	116.840	19,0	-20,456	-69,532
Pozo Almonte Solar III	16,0	2014	25	Psi	58.683	22,0	-20,249	-69,753
Pozo Almonte Solar I	9,0	2015	25	Psi	35.000	22,0	-20,268	-69,749
Bellavista I	9,0	2019	30	Psi	33.120	28,0	-20,798	-69,693
Pozo Almonte Solar II	7,5	2014	25	Psi	27.476	22,0	-20,274	-69,759

Figura A.3: Información de los parques solares ubicados en la región de Tarapacá.

La siguiente figura muestra los datos recopilados para los 31 parques que se encuentran en la región de Antofagasta:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Sol del Desierto	258,7	2022	35	Msi	582.930	23,3	-22,197	-69,560
Domeyko 2	204,0	2022	25	MBsi	472.590	27,5	-24,066	-69,582
Santa Isabel	170,2	2021	30	Msi	436.781	25,4	-22,043	-69,584
Sol de Lila	163,0	2022	25	MBsi	407.400	22,5	-24,051	-68,579
Valle del Sol	149,9	2022	30	MBsi	477.708	30,5	-22,334	-69,570
Bolero	138,2	2018	25	Psi	475.000	26,5	-23,482	-69,405
Finis Terrae	138,0	2017	25	Psi	518.320	26,5	-22,345	-69,522
Ampliación Finis Terrae	126,2	2022	25	MBsi	315.900	23,3	-22,351	-69,511
Tamaya Solar	109,2	2022	35	Msi	298.980	22,5	-22,174	-70,092
San Pedro	104,5	2021	35	MBsi	234.696	27,5	-22,543	-68,766
Conejo Solar	104,0	2016	30	Psi	392.640	26,5	-25,523	-70,153
Cerro Dominador	100,2	2018	30	Psi	392.000	22,5	-22,783	-69,479
Pampa Tigre	100,0	2022	51	Msi	265.000	24,9	-23,859	-69,801
Nuevo Quillagua	96,5	2021	30	MBsi	257.110	31,7	-21,668	-69,492
Capricornio	87,9	2022	30	Msi	249.210	22,7	-23,422	-70,178
Andes Solar II	86,8	2020	30	MBsi	162.149	32,3	-24,011	-68,571
Pampa Solar Norte	69,4	2016	40	Psi	258.096	22,0	-25,534	-70,174
María Elena	68,0	2015	25	Psi	240.640	27,6	-22,220	-69,575
Azabache	59,8	2022	25	MBsi	154.170	23,3	-22,513	-68,821
Usya	55,9	2020	30	Msi	187.200	22,5	-22,489	-68,848
Lalackama I	55,0	2015	25	Psi	197.030	22,0	-25,118	-70,292
Uribe Solar	52,8	2017	25	Psi	182.960	22,5	-23,560	-70,216
Jama	52,7	2016	30	Psi	186.480	23,0	-22,578	-68,696
La Cruz Solar	50,0	2022	40	MBsi	130.000	29,2	-22,260	-69,608
Andes Solar	21,8	2016	30	Psi	73.809	26,5	-24,012	-68,581
Lalackama II	16,5	2015	25	Psi	59.110	22,0	-25,118	-70,292
Paine	9,1	2021	30	Msi	24.250	23,5	-22,481	-68,971
Quetena	9,1	2021	30	MBsi	18.648	32,3	-22,456	-68,960
Victoria	9,0	2020	30	Psi	29.960	22,6	-22,480	-68,974
Calama Solar I	9,0	2017	25	Psi	32.000	22,4	-22,447	-68,864
Puerto Seco Solar	9,0	2017	25	Psi	32.000	22,4	-22,450	-68,866

Figura A.4: Información de los parques solares ubicados en la región de Antofagasta.

A continuación se encuentra los datos recogidos para la caracterización de los 27 campos solares que se encuentran en la región de Atacama:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Campos del Sol Sur	382,0	2022	25	MBsi	974.000	26,5	-27,068	-69,925
Malgarida I y II	204,3	2021	30	Msi	583.886	22,7	-26,274	-69,959
El Romero	196,0	2017	30	Psi	776.000	24,0	-29,138	-70,893
Campos del Sol Norte	184,8	2022	25	MBsi	399.840	27,0	-26,656	-69,944
Campos del Sol Centro	184,8	2022	25	MBsi	399.840	27,0	-26,696	-69,942
Río Escondido	160,7	2021	25	Msi	435.000	22,5	-27,881	-70,175
Luz del Norte	141,0	2016	30	CdTe	1.710.720	12,0	-27,028	-69,891
Valle Escondido	105,0	2022	40	Msi	228.000	24,9	-27,810	-70,275
Diego de Almagro Sur I	104,0	2022	25	MBsi	235.000	30,1	-26,594	-69,972
Diego de Almagro Sur II	104,0	2022	25	MBsi	235.000	30,1	-26,594	-69,972
Llano de Llampos	101,0	2014	25	Msi	310.000	22,0	-27,114	-70,172
Carrera Pinto	93,0	2016	30	Psi	560.832	19,0	-27,007	-69,867
Sol de los Andes	82,4	2022	30	MBsi	239.000	27,5	-26,312	-69,932
Javiera	69,0	2015	25	Psi	224.000	27,6	-26,310	-70,219
Salvador	68,0	2015	30	Msi	161.280	25,4	-26,313	-69,863
Almeyda	56,8	2020	30	Psi	187.620	26,0	-26,203	-70,096
San Andrés	50,6	2014	25	Psi	166.896	22,0	-27,253	-70,111
Los Loros	46,0	2016	25	Psi	178.200	29,0	-27,853	-70,171
Chañares	36,0	2015	40	Psi	133.333	22,0	-26,369	-70,086
Diego de Almagro	24,0	2014	25	CdTe	186.240	12,0	-26,383	-70,023
Diego de Almagro	12,0	2014	25	Psi	39.996	27,0	-26,383	-70,023
Valle Solar Oeste	9,0	2019	30	Psi	35.400	22,0	-27,355	-70,399
Valle Solar Este	9,0	2019	30	Psi	35.400	22,0	-27,355	-70,391
Malaquita Solar II	9,0	2019	30	Psi	35.400	22,0	-27,841	-70,182
Cachiyuyo Solar II	9,0	2019	30	Psi	35.400	22,0	-27,839	-70,215
Covadonga	9,0	2020	30	Msi	28.924	22,5	-26,434	-70,307
Antay	9,0	2017	25	Msi	42.200	22,5	-27,495	-70,383
Diego de Almagro Solar	8,0	2018	25	Psi	32.984	27,6	-26,370	-70,066

Figura A.5: Información de los parques solares ubicados en la región de Atacama.

En este caso, si bien el campo solar Diego de Almagro se considera como un solo parque, su información se encuentra dada en dos partes debido a que cuenta con dos tipos de paneles distintos.

A continuación se muestran los datos recopilados para los 17 parques fotovoltaicos de la región de Coquimbo:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
El Pelicano	108,1	2018	35	Msi	254.880	25,4	-29,148	-70,877
La Huella	85,2	2021	30	Msi	214.704	22,5	-29,141	-70,888
Las Majadas	9,0	2021	40	MBsi	21.438	30,1	-30,669	-70,939
Ovalle Norte	9,0	2021	30	MBsi	24.192	28,6	-30,570	-71,238
Llanos de Potroso	9,0	2020	40	Psi	31.350	25,5	-29,754	-70,860
Santa Francisca	6,0	2021	30	MBsi	11.102	30,6	-30,017	-70,612
Alturas de Ovalle	6,0	2016	30	Psi	21.504	26,5	-30,554	-71,241
Canesa Solar	3,0	2018	30	Msi	8.736	23,1	-31,721	-71,129
Amparo del Sol	3,0	2018	30	Psi	10.620	25,8	-30,612	-71,329
Chalinga Solar	3,0	2019	30	Msi	8.008	23,1	-31,762	-70,973
Illapel 5X	3,0	2019	30	Msi	8.736	23,1	-31,613	-71,143
Cuz Cuz	3,0	2017	30	Psi	10.100	22,4	-31,664	-71,216
Luna del Norte	3,0	2015	30	Psi	13.244	19,0	-30,041	-70,680
Sol del Norte	3,0	2015	30	Psi	13.244	19,0	-30,040	-70,682
Chuchifí	2,9	2016	20	Psi	10.160	22,0	-31,747	-71,079
Santa Clara	2,8	2019	25	Psi	9.240	22,5	-30,609	-71,417
Punta Baja Solar	2,0	2019	30	Msi	6.960	22,2	-29,359	-71,047

Figura A.6: Información de los parques solares ubicados en la región de Coquimbo.

Los datos de los 26 campos fotovoltaicos (Piquero y Boco se encuentran 2 veces pero corresponden a un solo parque) ubicados en la región de Valparaíso se encuentra a continuación:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Doña Carmen Solar	34,6	2017	25	Psi	124.980	22,0	-32,484	-71,250
Llay Llay	9,0	2021	35	Msi	28.980	23,0	-32,853	-70,959
Taranto Solar	9,0	2022	30	MBsi	24.948	29,0	-33,377	-71,419
Chacabuco	9,0	2020	30	Msi	32.592	26,5	-32,954	-70,710
Olivillo	9,0	2018	25	Psi	32.832	22,5	-33,290	-71,392
Encon Solar	8,6	2019	30	Msi	28.380	22,2	-32,730	-70,746
Esfena	6,7	2021	40	Msi	16.072	24,9	-32,237	-70,808
Panquehue II	6,0	2017	45	Psi	21.888	26,5	-32,778	-70,813
Guadalupe	6,0	2021	25	Msi	14.812	26,0	-32,851	-70,532
Piquero	6,0	2018	30	Msi	18.709	26,1	-33,297	-71,447
Jahuel	6,0	2020	25	Psi	21.600	22,5	-32,682	-70,619
El Boco II	4,7	2017	30	Msi	11.312	25,4	-32,852	-71,243
Lingue	3,0	2021	25	Msi	7.890	23,0	-33,383	-71,393
El Boco I	3,0	2017	30	CdTe	33.333	12	-32,852	-71,243
Rinconada Norte	3,0	2021	40	Msi	6.426	26,1	-32,658	-70,689
Calle Larga	3,0	2019	30	Msi	10.055	22,5	-32,884	-70,611
Konda	3,0	2020	30	MBsi	8.082	25,0	-32,783	-70,715
Piquero	3,0	2018	30	Msi	8.294	26,5	-33,297	-71,447
Marin	3,0	2019	30	Psi	10.800	22,2	-32,788	-70,735
Santa Laura	3,0	2018	30	Psi	9.350	25,8	-32,400	-71,033
Santa Julia	3,0	2016	30	Psi	11.520	22,0	-32,302	-71,103
Cruz Solar	3,0	2019	30	Msi	9.802	22,5	-32,795	-70,865
Santuario Solar	3,0	2017	30	Psi	10.800	22,2	-32,892	-70,689
Catan Solar	3,0	2018	30	Psi	10.880	22,2	-32,728	-70,602
Magnolios Solar	3,0	2021	25	Msi	7.890	23,0	-33,392	-71,443
Casuto	2,8	2019	30	Msi	7.980	22,5	-32,852	-70,711
Los Paltos	2,7	2020	25	Msi	8.064	22,5	-32,399	-71,031
Catemu	2,0	2020	30	Msi	6.876	22,5	-32,734	-70,964

Figura A.7: Información de los parques solares ubicados en la región de Valparaíso.

La figura que se muestra a continuación posee los datos recopilados para los 27 parques fotovoltaicos que se ubican en la región Metropolitana:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Quilapilún	103,0	2017	25	Psi	355.000	22,0	-33,104	-70,656
Santiago Solar	92,7	2018	25	Psi	358.700	26,5	-33,093	-70,857
Pepa Solar	9,6	2020	30	Msi	27.894	22,5	-33,755	-70,834
Nahuén Solar	9,2	2021	30	Psi	25.872	22,5	-33,752	-71,187
Los Molinos	9,0	2021	25	Psi	28.680	22,5	-33,572	-71,264
San Ramiro	9,0	2021	25	Msi	27.636	22,5	-34,008	-71,401
Ovejería	9,0	2018	25	Psi	28.400	26,5	-33,095	-70,769
Sol de Septiembre	9,0	2020	30	Psi	34.560	26,5	-33,299	-70,865
Santa Rosa	9,0	2019	30	Psi	32.832	22,5	-34,001	-71,290
Darlin Solar	9,0	2020	30	Msi	27.368	22,5	-33,754	-70,838
Eclipse Solar	9,0	2020	30	Psi	40.135	19,0	-33,907	-71,427
El Roble	9,0	2017	30	Psi	32.832	26,0	-34,036	-71,389
El Litre Solar	9,0	2020	30	Psi	33.600	23,0	-33,128	-70,778
El Laurel	7,5	2019	30	Psi	32.832	25,8	-33,678	-71,021
Casabermeja	6,9	2021	25	Msi	26.144	25,5	-33,517	-70,970
Alhue	6,0	2021	30	Msi	16.128	22,5	-34,004	-71,279
Puente Solar	3,0	2020	30	MBsi	6.888	27,5	-33,549	-70,838
Valle de la Luna II	3,0	2017	25	Psi	10.080	22,3	-33,285	-70,846
Trebal Solar	3,0	2020	30	Msi	8.323	28,0	-33,510	-70,857
Altos de Tilttil	3,0	2019	25	Msi	8.082	22,5	-33,097	-70,889
Santa Inés Solar	3,0	2020	30	MBsi	7.784	25,5	-33,125	-70,864
Lo Sierra	3,0	2019	30	Psi	10.000	22,5	-33,984	-71,328
Salerno Solar	2,8	2022	30	MBsi	6.720	27,5	-33,902	-71,431
Citrino	2,8	2019	30	Psi	8.820	22,0	-33,563	-70,902
Pirque	2,8	2019	30	Msi	8.092	26,5	-33,682	-70,622
Vicente Solar	2,8	2021	30	Msi	5.656	27,2	-33,678	-70,618
Parque Solar Marambio	2,7	2021	30	MBsi	5.544	31,6	-33,768	-71,236

Figura A.8: Información de los parques solares ubicados en la región Metropolitana.

La información de los 25 parques fotovoltaicos que se ubican en la región de O'Higgins se muestra en la siguiente figura:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Las Tencas	9,0	2021	30	Psi	32.508	22,5	-34,420	-71,091
La Blanquina	9,0	2019	30	Msi	34.560	28,0	-34,065	-70,649
Placilla	9,0	2019	30	Psi	32.538	22,4	-34,609	-71,098
Mostazal	9,0	2018	30	Psi	33.600	23,0	-33,983	-70,674
Marchigue II	9,0	2017	45	Psi	32.832	26,5	-34,407	-71,667
La Esperanza II	9,0	2016	45	Psi	32.832	22,0	-34,335	-71,537
Tricahue	9,0	2019	30	Msi	28.000	26,5	-34,360	-70,825
El Castaño	8,6	2021	30	Psi	28.320	25,8	-34,298	-71,291
La Acacia	8,6	2018	30	Psi	30.160	25,8	-34,485	-71,085
El Romeral	8,1	2020	30	Msi	25.200	23,0	-34,731	-71,033
Peumo	8,1	2021	30	Psi	28.710	22,5	-34,416	-71,128
Argomedo	8,0	2020	30	Msi	24.360	23,0	-34,358	-71,004
Rinconada	8,0	2019	30	Psi	28.728	22,5	-34,410	-70,817
Los Libertadores	8,0	2018	30	Psi	29.184	26,5	-34,091	-70,783
Doñihue	7,5	2019	30	Psi	27.115	22,5	-34,283	-70,955
Rovian	7,0	2019	30	Psi	25.536	22,4	-34,650	-71,224
El Queule	7,0	2019	30	Psi	26.400	25,8	-34,222	-71,397
La Lajuela	6,9	2019	25	Psi	29.300	26,5	-34,650	-71,386
Lo Miranda	6,0	2019	30	Psi	22.680	22,0	-34,201	-70,881
La Frontera	4,8	2017	45	Psi	18.050	26,5	-34,826	-71,766
Don Mariano	3,0	2020	30	Psi	9.240	22,5	-34,495	-70,821
Las Mercedes	3,0	2019	30	Msi	8.064	25	-34,280	-70,801
Guadalao	3,0	2020	30	Msi	7.560	22,5	-34,254	-71,572
La Muralla	3,0	2021	30	MBsi	6.048	28,6	-34,451	-71,113
Parque Solar Membrillo	3,0	2021	30	MBsi	6.720	28,6	-34,787	-70,993

Figura A.9: Información de los parques solares ubicados en la región de O'Higgins.

A continuación se muestran los datos de los 20 campos solares de la región del Maule:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Pitao	9,1	2021	30	Psi	27.216	22,5	-34,826	-71,137
Quinantu Solar	9,1	2021	30	Psi	27.216	28,0	-35,501	-71,580
San Antonio	9,0	2021	30	Psi	31.740	22,5	-35,847	-71,541
Ciprés	9,0	2021	25	Psi	32.832	22,0	-35,814	-71,629
Rauquén	9,0	2020	30	Psi	32.832	22,4	-34,916	-71,145
Pachira	9,0	2021	25	MBsi	24.719	27,5	-35,855	-71,623
Granada	9,0	2020	25	Psi	32.832	22,5	-35,811	-71,634
Linares Solar	9,0	2021	25	MBsi	24.225	27,5	-35,855	-71,624
Villa Alegre	9,0	2020	25	Msi	28.800	22,5	-35,683	-71,701
Santa Fe	9,0	2020	25	Msi	27.936	22,5	-35,624	-71,711
Talca	9,0	2019	30	Psi	34.560	22,0	-35,459	-71,555
Paraguay	9,0	2020	32	Psi	33.780	22,4	-35,113	-71,330
San Javier	6,0	2021	25	Msi	20.664	22,5	-35,593	-71,686
Los Tordos	5,0	2022	30	Psi	32.508	22,5	-35,479	-71,581
Lemu	5,0	2020	30	Psi	18.240	22,4	-35,616	-71,791
Las Perdices	3,0	2019	25	Msi	8.333	22,5	-35,358	-71,587
Villa Seca	3,0	2019	25	Msi	8.064	26,5	-35,865	-71,819
Pencahue Este	3,0	2021	25	MBsi	6.720	28,6	-35,405	-71,743
Bicentenario	3,0	2020	30	Msi	8.091	22,5	-36,140	-71,848
Erinome	2,8	2021	30	MBsi	5.544	31,6	-35,436	-71,716

Figura A.10: Información de los parques solares ubicados en la región del Maule.

Los datos de los 9 parques que se encuentran en la región del Ñuble se muestran a continuación:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Raúlí	9,1	2020	25	Msi	24.912	23,5	-37,114	-71,744
Mutupin	9,0	2021	35	Msi	25.200	27,5	-36,437	-71,875
La Palma Solar	9,0	2021	25	MBsi	25.340	29,5	-36,599	-72,146
Berrueco	9,0	2021	35	Msi	31.860	22,4	-36,673	-72,143
Venturada	9,0	2021	35	Msi	35.910	22,4	-36,673	-72,140
Meco Chillán	6,0	2021	30	MBsi	16.224	28,6	-36,750	-72,136
Las Codornices	3,0	2019	30	Msi	9.900	22,5	-36,453	-72,019
Cocharcas	2,8	2020	30	Psi	8.820	22,8	-36,527	-72,094
Santa Luisa	2,6	2021	25	MBsi	6.720	27,5	-36,456	-71,969

Figura A.11: Información de los parques solares ubicados en la región de Ñuble.

La información de los 3 parques fotovoltaicos que se encuentran en la región del Biobío:

Parque Solar				Paneles Solares			Coordenadas	
Nombre	Pot. [MW]	Año	Vida útil	Tipo	Cantidad	Peso [kg]	Latitud	Longitud
Cortijo	9,1	2021	30	Psi	35.040	28,0	-37,099	-72,393
Moya	9,0	2021	30	Psi	34.320	28,0	-37,068	-72,355
El Resplandor	2,6	2020	25	Psi	7.056	24,9	-37,040	-72,383

Figura A.12: Información de los parques solares ubicados en la región del Biobío.

En el enlace⁸ ubicado a pie de página se encuentra una carpeta de Google Drive donde se encuentra un documento llamado “Anexo A - Parque fotovoltaicos en Chile.xlsx” se ubica el documento con esta información y parte de los enlaces utilizados como referencia para cada parque solar.

⁸ https://drive.google.com/drive/folders/1OSutzAcqIsw7n9PPKJhWtTpzBHaVbvg_?usp=sharing

Anexo B. Ubicación de los parques en Chile

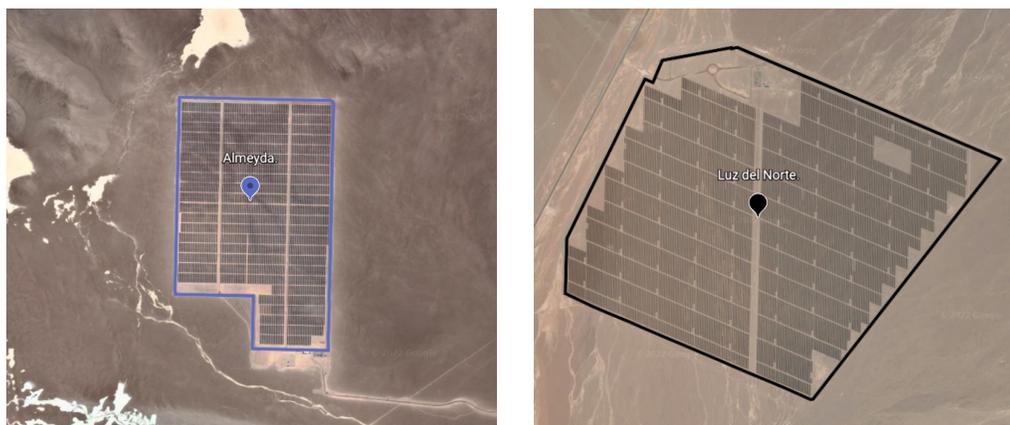
Para determinar la ubicación, particularmente la latitud y la longitud de un punto representativo para los parques fotovoltaicos en Chile, se utilizó Google Earth en conjunto con la información entregada por los titulares de los campos solares para identificar, a través de imágenes satelitales, las coordenadas correspondientes.

Con esto, a cada uno de los parques fotovoltaicos se les asignó un marcador para representar las coordenadas representativas y se delimitaron sus límites mediante el uso de la herramienta “Dibujar una línea o forma”. Además, se utilizaron diferentes colores en las líneas y marcadores para identificar el tipo de tecnología de los paneles instalados en el campo solar. La figura que se muestra a continuación muestra el código de colores utilizado para la identificación de tecnologías:

Código de colores Google Earth	
	Policristalino
	Monocristalino
	Monocristalino bifacial
	Capa fina

Figura B.1: Código de colores utilizado para los parques en Google Earth.

A continuación se pueden observar algunos ejemplos de parques fotovoltaicos identificados a través de Google Earth:



(a) Parque fotovoltaico Almeyda.

(b) Parque fotovoltaico Luz del Norte.

Figura B.2: Imágenes satelitales de algunos parques fotovoltaicos chilenos.

En el enlace⁹ ubicado en el pie de página corresponde a una carpeta de Google Drive donde se encuentra un archivo titulado “Parques Solare.kml” que corresponde al archivo creado en Google Earth con la identificación de los parques fotovoltaicos.

⁹ https://drive.google.com/drive/folders/1OSutzAcqIsw7n9PPKJhWtTpzBHaVbvg_?usp=sharing

Anexo C. Referencias evaluación económica

A continuación se presentan los precios de ventas de los distintos materiales y sus respectivas referencias:

Tabla C.1: Precios de venta de los materiales.

Material	Precio [\$/kg]	Referencia
Vidrio	10	reciclean.cl
Aluminio	950	reciclajesanfrancisco.cl
Cobre	4.500	reciclajesanfrancisco.cl
Silicio	1.400	Informe In-Data 2 [19]

De igual modo, la tabla de a continuación contiene los costos de los equipos considerados para la operación de la planta con sus respectivas referencias:

Tabla C.2: Costos de la maquinaria.

Ítem	Precio [\$/kg]	Referencia
Línea de reciclaje NPC	1.079.000.000	Sandoval (2019) [37], Consulta directa
Línea de reciclaje Suny	160.172.800	Consulta directa
Solar panel tester	14.120.000	spanish.alibaba.com
Cinta transportadora	1.217.520	fer-plast.com
Granulador de cable	6.849.670	spanish.alibaba.com
Camión de carga liviana	40.783.680	salfaautomotriz.cl
Camión de carga pesada	81.490.000	chileautos.cl
Transpaleta manual	321.300	salcom.cl
Grúa horquilla	16.648.100	equipromaq.cl
Corta cables	13.800	rhona.cl
Múltimetro digital	34.990	molychile.cl
Cámara termográfica	419.990	molychile.cl
Cepillo de limpieza	987.070	Aliexpress.com

Las referencias de los costos unitarios para calcular los gastos operacionales del proyecto son:

Tabla C.3: Referencias costos de operación de la planta.

Ítem	Precio	referencia
Electricidad	2,5 [\$/kWh]	energia.gob.cl
Agua potable	1.290 [\$/m ³]	nuevaatacama.cl
Agua industrial	340 [\$/m ³]	lider.cl
Arriendo	750 [\$/m ²]	new.yapo.cl
Desecho	60.000 [\$/t]	kyklos.cl

Anexo D. Flujo de caja

A continuación se presenta para el flujo de caja de la planta de reciclaje bajo las consideraciones descritas en el capítulo 9:

Año	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos por ventas (+)		1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572
Costo total (-)		-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036
Revisión equipos (-)				-247.894.735			-247.894.735
Depreciación lineal (-)		-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704
Intereses (-)		-269.252.703	-260.778.303	-251.456.464	-241.202.441	-229.923.015	-217.515.647
Pérdida/ganancia de capital (-)							
Pérdida por venta capital de trabajo (-)							
Utilidad Antes de Impuestos (UAI)		552.630.129	561.104.528	322.531.633	580.680.391	591.959.817	356.472.450
Impuesto (-) [20%]		-110.526.026	-112.220.906	-64.506.327	-116.136.078	-118.391.963	-71.294.490
Utilidad Después de Impuestos (UDI)		442.104.103	448.883.622	258.025.306	464.544.313	473.567.853	285.177.960
Depreciación Lineal (+)		443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704
Pérdida por venta activo fijo (+)							
Pérdida por venta capital de trabajo (+)							
Flujo de caja operacional		885.219.807	891.999.327	701.141.010	907.660.017	916.683.557	728.293.664
Inversión (-)	-6.557.095.227						
Capital de trabajo (-)	-174.222.345						
Valor residual (+)							
Valor mercado capital de Trabajo (+)							
Préstamo (+)	2.692.527.029						
Amortización préstamo (-)		-84.743.995	-93.218.394	-102.540.234	-112.794.257	-124.073.683	-136.481.051
Flujo de caja de capitales	-4.038.790.543	-84.743.995	-93.218.394	-102.540.234	-112.794.257	-124.073.683	-136.481.051
Flujo Caja Privado	-4.038.790.543	800.475.812	798.780.932	598.600.776	794.865.759	792.609.874	591.812.613

7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572	1.787.665.572
-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036	-522.667.036
		-247.894.735			-247.894.735			
-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704	-443.115.704
-203.867.541	-188.854.626	-172.340.419	-154.174.791	-134.192.600	-112.212.190	-88.033.739	-61.437.443	-32.181.518
								-638.985.533
								-34.844.469
618.015.290	633.028.206	401.647.678	667.708.041	687.690.232	461.775.907	733.849.092	760.445.388	115.871.312
-123.603.058	-126.605.641	-80.329.536	-133.541.608	-137.538.046	-92.355.181	-146.769.818	-152.089.078	-23.174.262
494.412.232	506.422.565	321.318.143	534.166.433	550.152.185	369.420.725	587.079.274	608.356.310	92.697.049
443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704	443.115.704
								638.985.533
								34.844.469
937.527.936	949.538.269	764.433.847	977.282.137	993.267.889	812.536.430	1.030.194.978	1.051.472.014	1.209.642.755
								549.345.199
								139.377.876
-150.129.156	-165.142.072	-181.656.279	-199.821.907	-219.804.098	-241.784.508	-265.962.959	-292.559.254	-321.815.180
-150.129.156	-165.142.072	-181.656.279	-199.821.907	-219.804.098	-241.784.508	-265.962.959	-292.559.254	366.907.896
787.398.780	784.396.197	582.777.567	777.460.229	773.463.791	570.751.922	764.232.019	758.912.760	1.576.550.651

Figura D.1: Flujo de caja de la planta de reciclaje.