



Informe 3

Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil

Equipo de Proyecto

CLIENTE

Contraparte	Daniel Menares
Contraparte	Javier Obach
Contraparte	Carlos Toro
Contraparte	Claudia Guerrero
Contraparte	Norma Plaza

In-Data

Jefe de proyecto	Cristóbal Muñoz
Consultor	Boris Manzano
Consultor	Cristián Yáñez

RIGK CHILE

Consultor	Nesko Kuzmicic Astorga
Consultora	Anne Biehl
Experto Internacional	Jan Bauer

Tabla de contenido

Acrónimos	4
1 Introducción	5
2 Alcances del Informe.....	7
3 Impacto de componentes de módulos	8
3.1 Filtración de plomo y cadmio	8
3.1.1 Plomo	8
3.1.2 Cadmio	9
3.2 Pérdida de recursos.....	10
3.2.1 Vidrio y aluminio	10
3.2.2 Metales raros	11
3.3 Matriz de impactos ambientales de componentes de módulos FV.....	11
4 Propuesta de alternativas de tratamiento.....	13
4.1 Soluciones posibles en Chile para el tratamiento de módulos FV	13
4.1.1 Separación de componentes.....	15
4.1.2 Delaminación.....	16
4.1.3 Purificación.....	17
4.2 Escenarios al final de la vida útil de módulos FV.....	18
4.2.1 Vida útil informada por productores	18
4.2.2 Vida útil declarada por proyectos fotovoltaicos en Chile	19
4.2.3 Vida útil financiera de módulos fotovoltaicos.....	20
4.2.4 Proyecciones de generación de residuos generales de módulos fotovoltaicos	21
4.2.5 Proyección de generación de residuos en detalle de módulos fotovoltaicos.....	25
4.3 Propuesta de recolección, transporte y almacenamiento de módulos FV para Chile	34
4.3.1 Recolección	34
4.3.2 Transporte	37
4.3.3 Almacenamiento	38
4.4 Propuesta para el tratamiento de los residuos de módulos FV para Chile.....	39
4.4.1 Prevención.....	1
4.4.2 Preparación para la reutilización y reutilización	1
4.4.3 Reciclaje.....	3
4.4.4 Una planta hipotética especializada para el reciclaje de módulos fotovoltaicos	5
4.4.5 Pronostico del momento cuando se justifica la creación de infraestructura	6

5	Plan de acción	17
5.1	Desafíos por abordar	17
5.1.1	Creación y actualización de una base de datos de módulos FV y sus características	17
5.1.2	Certificación de la reciclabilidad de módulos FV.....	18
5.1.3	Definición y homologación de vida útil de los módulos fotovoltaicos en Chile.....	19
5.1.4	Definición de la implementación de la REP en Chile.....	20
5.1.5	Definición del impacto ambiental de los componentes de módulos fotovoltaicos..	22
5.1.6	Recolección, transporte y almacenamiento de los residuos.....	23
5.2	Propuesta de plan de acción	24
6	Referencias.....	26

Acrónimos

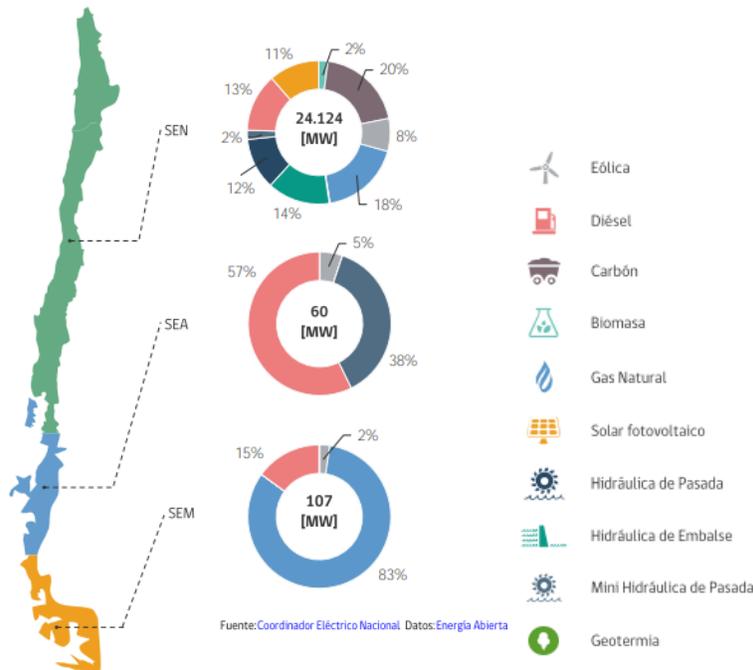
AEE	Artículos Eléctricos y Electrónicos
CdTe	Teluro de Cadmio
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIGS	Cobre, Indio, Galio, Selenio
CNE	Comisión Nacional de Energía
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
EAR	Stiftung EAR- Fundación EAR: Elektro-Altgeräte-Register
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
FIT	Feed-in tariff
GIS	Galio, Indio, Selenio
GW	Gigawatt
I+D	Investigación y desarrollo (R&D en inglés)
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
PELP	Planificación Energética de Largo Plazo
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
PMGD	Pequeños Medios de Generación Distribuida
PMG	Pequeños Medios de Generación
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
Si	Silicio

1 Introducción

Chile cuenta con uno de los mayores potenciales de energía solar del mundo, lo que junto a un sólido marco normativo, políticas de largo plazo que han traído certidumbre al mercado (ej. meta ERNC) y la disminución del costo de las tecnologías para la generación eléctrica mediante energía solar, ha sentado las condiciones para la masiva implementación de sistemas fotovoltaicos. Además, la autoridad ha dado señales de aumentar su participación, debido a que por medio de la Ruta Energética 2018-2022 “Liderando la modernización del sello ciudadano”, consideró en su eje número 4, el fomento de las soluciones renovables. Por lo tanto, al proyectarse una penetración masiva de la tecnología solar fotovoltaica en el país, adquiere especial importancia la de planificar la incorporación al mercado de nuevas tecnologías que permitan prevenir la generación de residuos, entre otras cosas, aumentando la reutilización, reducción, valorización y reciclaje de los módulos de dichos proyectos.

En vista de lo anterior, se tiene que a abril de 2020 existen casi 3 [GW] de proyectos fotovoltaicos conectados al Sistema Eléctrico Nacional (CNE, 2020), alcanzando un 11% de participación en el total de capacidad instalada a nivel nacional. Asimismo, actualmente se encuentran en construcción 2,820 [MW] (CNE, 2020), lo cual producirá prácticamente una duplicación de la capacidad actual y su participación en el total.

Figura 1: Distribución de la capacidad instalada por tecnología en el SEN, SEA y SEM a abril de 2020.¹



¹ Fuente: (CNE, 2020)

Asimismo, en proyectos de pequeña escala para autoconsumo, se tiene que existen cerca de 49 [MW] instalaciones fotovoltaicas declaradas ante la SEC (Energía Abierta, 2020), las cuales principalmente corresponden a proyectos realizados en techos de viviendas u otras edificaciones públicas y privadas.

Por otra parte, las proyecciones que ha desarrollado el Ministerio de Energía en el marco del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo plantean que esta tecnología seguirá aumentando su participación en términos de capacidad instalada y de generación eléctrica en el Sistema Eléctrico Nacional. Esto, en línea con los compromisos internacionales adoptados por el país en cuanto a la reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero, como lo son la contribución nacional determinada (NDC) al año 2030 y la meta de descarbonización del país al año 2050, en donde el sector de generación eléctrica juega un rol clave y el aumento de la participación de la generación mediante fuentes renovables será clave.

En esta línea, los proyectos fotovoltaicos, en algún momento cumplirán su vida útil, lo que originará una necesidad de cómo gestionar los residuos que se generen producto de su decomisionamiento o retiro. A esto, se le suman las componentes que presenten desperfectos durante la operación de esto, debiendo ser reemplazadas.

Dado lo anterior, existe la posibilidad de que se tenga una cantidad tal de componentes por este ítem a nivel nacional, que hace necesario estudiar las distintas estrategias y acciones que deben tomar el país y que vaya en línea con los principios de la ruta energética 2018-2022, la Política Energética de Chile al 2050 y los compromisos internacionales como la NDC de Chile al 2030. Lo anterior, dadas las regulaciones ambientales que se han promulgado en los últimos años, sobre todo en lo que respecta a la Ley N°20.920 que establece el marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje por parte del Ministerio del Medio Ambiente, la cual entre otros aspectos define regular 6 productos prioritarios a través de la responsabilidad extendida del productor, entre los cuales se encuentran los AEE que incluyen entre sus categorías los paneles fotovoltaicos.

En vista de ello, es que el Ministerio de Energía contrató los servicios de las empresas In-Data y Rigk, para el desarrollo del estudio “Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil”. Este tiene por finalidad determinar las posibles acciones futuras que se debiese tomar en el país para el tratamiento de tales módulos una vez que cumplen con su vida útil.

2 Alcances del Informe

El presente documento, corresponde al Informe 3 del estudio “Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil”. Esta entrega aborda las actividades asociadas a los objetivos específicos 4 y 5 de las bases técnicas, en cuanto a “determinar las externalidades ambientales generadas a partir de los componentes de los módulos fotovoltaicos (FV) identificados en el apartado 1) del numeral 2.2” y a “analizar las potenciales alternativas de tratamiento de elementos generados a partir de sistemas fotovoltaicos”. Tales actividades son:

- Desarrollar una matriz de impacto que permita identificar y describir los efectos/impactos de los materiales derivados de los paneles fotovoltaicos, describirlos y cuantificarlos.
- Indicar los componentes que no son posibles de extraer de los módulos fotovoltaicos, describirlos y cuantificarlos.
- Proponer cual es el manejo más óptimo en cuanto a transporte, almacenaje de los componentes indicados la matriz de impacto, e indicar cuál debe ser su disposición final.
- Indicar las soluciones posibles para el tratamiento de los módulos fotovoltaicos en Chile, indicando sus ventajas y desventajas.
- Proponer soluciones para la recolección de los componentes reciclables de sistemas fotovoltaicos, ya sean, on-grid residenciales, PMGD y *utility scale*. Las soluciones deben contemplar las ventajas, desventajas y desafíos de cada tipo de proyecto.
- Describir en detalle los desafíos por abordar de cada sector (residencial y no residencial) de manera cuantificable. Se espera contar con al menos una tabla comparativa que integre: tamaño (en potencia instalada) de proyectos, volúmenes de componentes en cada caso, logística según tipo de proyecto y costos estimados. Se deberán evaluar los 3 tipos de proyectos (on-grid residencial, PMGD y *utility scale*).
- Pronosticar al final de la vida útil de los módulos, el momento en que se alcanzará el volumen que justifique la creación de una planta de reciclaje en Chile para esta tecnología. Este análisis se requiere considerando la generación de residuos en Chile, y un escenario respecto de toda la generación del cono sur al 2050.
- Identificar y evaluar distintas alternativas de Gestión de los componentes en desuso al final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos.
- Elaborar un plan de acción para realizar una correcta gestión de los módulos fotovoltaicos posterior a su vida útil, y los actores relevantes en el proceso.

Dada la estructura del presente informe y del trabajo del equipo consultor, las actividades anteriormente señaladas se dan cuenta en los siguientes capítulos, detallando los pasos llevados a cabo y los resultados respectivos para cumplir con ellas.

3 Impacto de componentes de módulos

Según lo abordado a lo largo del estudio, los módulos fotovoltaicos están compuestos por diversos materiales, siendo el vidrio el que tiene una más alta participación en peso del total, alcanzando un 78% del total en un módulo cristalino de una cara y más de un 86% en el caso de un módulo cristalino bifacial. No obstante, es de interés analizar el potencial impacto ambiental que tiene cada uno de los componentes de los módulos fotovoltaicos analizados en caso de no ser adecuadamente gestionados al final de su vida útil.

A continuación, se realiza un listado de los materiales componentes de módulos fotovoltaicos que la Unión Europea ha identificado que, si es que estos no son bien dispuestos al final de su vida útil, podrían causar impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana (European Commission DG ENV, 2011), los cuales son:

- Filtración de plomo
- Filtración de cadmio
- Pérdida de recursos convencionales, principalmente vidrio y aluminio
- Pérdida de metales raros

3.1 Filtración de plomo y cadmio

El plomo y el cadmio son dos elementos presentes en algunos módulos fotovoltaicos que la Comisión Europea ha detectado que podrían tener un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana. A continuación, se describen los impactos de la filtración de ellos, producto de una incorrecta disposición final de los módulos fotovoltaicos.

3.1.1 Plomo

Tal como se revisó en informes anteriores del estudio, el plomo se encuentra presente principalmente en los módulos basados en silicio en donde alcanza una participación cercana al 0.1% del total de la masa de un módulo fotovoltaico, lo cual es equivalente a un rango de 10 a 22 gramos dependiendo del productor (European Commission DG ENV, 2011). El plomo principalmente se emplea en el dopaje de la celda basada en silicio, por lo que este es empleado en forma de óxido.

El plomo empleado en los módulos fotovoltaicos en base a silicio está catalogado como un material tóxico para los humanos (NC Clean Energy Technology Center, 2017). En particular, el plomo es un metal pesado con un alto potencial de acumulación en humanos y en el medio ambiente.

Una vez ingresa en el cuerpo humano, este se distribuye en todo el cuerpo por medio de la sangre y se acumula en los huesos. Asimismo, dependiendo del nivel de exposición el plomo puede impactar de forma adversa en el sistema nervioso, en la función renal, el sistema inmune, en los sistemas reproductivos y en el sistema cardíaco (European Commission DG ENV, 2011).

En el caso de los ecosistemas cercanos a fuentes de plomo estos han demostrado un amplio rango de efectos adversos incluyendo pérdidas en la biodiversidad, disminución en el crecimiento de individuos y bajas en las tasas de reproducción de plantas y animales, junto con efectos neurológicos en vertebrados (European Commission DG ENV, 2011).

No obstante, tal como lo establecen diversos organismos internacionales y nacionales (CITUC, 2016), el impacto que puede tener el plomo sobre los humanos y el medio ambiente depende de cómo este interactúe con otros compuestos. Si bien la filtración de plomo de un módulo fotovoltaico basado en silicio es potencialmente pequeña, en caso de que este material permanezca al mismo pH que el panel, su exposición a sustancias con pH bajos, como el ácido nítrico o la lluvia, podría inducir una filtración de entre 13% a 90% del total del plomo contenido en la celda (European Commission DG ENV, 2011).

3.1.2 Cadmio

Otro material que es de interés considerar de forma similar al plomo, es el cadmio que se encuentra presente en los módulos capa fina (CdTe). Si bien, en Chile solo existen 3 proyectos con esta tecnología a la fecha (cerca de 3 millones de módulos), tal como se mencionó en informes anteriores, esta no se estima como una tecnología relevante en el mercado en el corto y mediano plazo. No obstante, es de interés analizar el posible impacto que podrían tener sobre la salud y el medio ambiente.

El cadmio, es un metal pesado que se acumula en organismos vivos, con una vida media biológica de 30 años; en donde enfermedades graves asociadas con un bajo envenenamiento por cadmio podrían tener una latencia de 10 años. El cadmio también tiene una alta toxicidad aguda², asociada a la acumulación en el cuerpo humano. También considerado como cancerígeno, el Cadmio puede causar cambios fisiopatológicos graves producto de una exposición recurrente a este (European Commission DG ENV, 2011).

Si bien tal elemento es tóxico, en los módulos fotovoltaicos del tipo capa fina este se encuentra en forma de Teluro de Cadmio, compuesto que tiene un 1/100 de la toxicidad del Cadmio libre (Kaczmar, 2011). Asimismo, el Teluro de Cadmio es un compuesto estable que no es volátil y no soluble en agua, incluso diversos estudios han demostrado que menos del 0.1% del Cadmio es emitido al ambiente en caso de un incendio en una planta fotovoltaica. En este sentido, el fuego

² Una toxicidad aguda de una sustancia química se refiere a los efectos adversos que se manifiestan tras la administración por vía oral o cutánea de una sola dosis de dicha sustancia, de dosis múltiples administradas a lo largo de 24 horas, o como consecuencia de una exposición por inhalación durante 4 horas (UNECE, 2007).

derrite el vidrio, logrando encapsular casi el 99% del Cadmio del módulo (NC Clean Energy Technology Center, 2017).

Por último, cabe señalar que se han realizado diversos estudios para analizar la toxicidad de los módulos capa fina (CdTe) bajo ciertas condiciones de disposición en rellenos sanitarios (ej. módulos rotos o con las celdas expuestas), siendo clasificados como un residuo no peligroso y aptos para tal gestión por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) (NC Clean Energy Technology Center, 2017). No obstante, otros informes (European Commission DG ENV, 2011) señalan que, si estos módulos son dispuestos en un relleno sanitario y posteriormente son expuestos a sustancias con pH bajos como el ácido nítrico o la lluvia, podría incrementar la filtración de cadmio en su estado puro entre un 29% a 40% (entre 0.32 y 1.84 gramos por panel).

3.2 Pérdida de recursos

Según la Dirección General para el Medio Ambiente de la Comisión Europea (DG ENV), es considerado como un impacto ambiental de la disposición final de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil, la pérdida de recursos y metales raros que pudiesen haber sido recuperados y se perdieron (European Commission DG ENV, 2011). Esta pérdida está considerada desde el punto de vista de componentes que tienen un alto porcentaje de reciclabilidad (LVR y HVR) y su pérdida de valor en el caso de no fuesen reciclados.

3.2.1 Vidrio y aluminio

Como se revisó anteriormente en el estudio, en todas las tecnologías de módulos fotovoltaicos analizadas más del 70% de su peso corresponde a vidrio templado equivalente a cerca de 16 kg por módulo, el cual tiene un alto grado de pureza para garantizar el paso de la luz solar hacia la celda fotovoltaica. De esta manera, el vidrio templado utilizado en los módulos fotovoltaicos no cuenta con otros materiales adosados o alguna adición de fluidos en su superficie (NC Clean Energy Technology Center, 2017).

Teniendo en vista lo anterior, cabe señalar que el vidrio de tales características es 100% reciclable y puede ser reciclado cuantas veces sea necesario, es decir es supraciclable, sin perder calidad o pureza en el proceso (Glass Packaging Institute, 2020).

Asimismo, según lo revisado en entregas anteriores, todas las tecnologías de módulos fotovoltaicos presentes en Chile poseen entre un 8% a 11% de su masa total en aluminio lo que equivale a un rango entre 2 a 3 kg, siendo el segundo material de mayor relevancia en estos. Además, el aluminio, por corresponder al marco de los módulos fotovoltaicos, se encuentra en estado puro y sin aleaciones.

Al igual que el vidrio, el aluminio también es altamente reciclable, alcanzando un porcentaje de recuperación cercano al 100% y generando un alto valor luego de tal proceso (The Aluminium Association, 2020).

3.2.2 Metales raros

Tal como fue revisado en el informe 2 de la consultoría, existen diversas tecnologías de módulos fotovoltaicos que se encuentran en desarrollo, ya sea a nivel de prototipos o en laboratorio que cuentan entre sus componentes diversos metales raros como indio, galio y selenio. No obstante, de las tecnologías disponibles en la actualidad a nivel comercial, solo los módulos basados en silicio cuentan con metales raros, principalmente plata. La pérdida de estos materiales y su no recuperación, es otro de los impactos ambientales considerados por la Comisión Europea para los módulos fotovoltaicos luego del fin de su vida útil.

En los módulos en base a silicio, la plata solo tiene una participación menor al 0.01% del total de la masa del módulo completo, correspondiendo a alrededor de 1 gramo por módulo. Si bien esta cantidad es menor, tal como fue expuesto en el Informe anterior, es un elemento de alto valor en el mercado y con gran potencial de venta una vez es recuperado. No obstante, según lo expuesto en (European Commission DG ENV, 2011), del total de la plata que se encuentra en un módulo fotovoltaico, la cual está contenida en la celda respectiva, solo se puede recuperar un 30% con los métodos de reciclajes disponibles en el mundo.

3.3 Matriz de impactos ambientales de componentes de módulos FV

Para las tecnologías analizadas de módulos fotovoltaicos (en base a silicio y capa fina) que se encuentran instaladas en Chile y que a futuro se estima que seguirán dominando el mercado, en base a los impactos ambientales estudiados se considera la siguiente matriz de impactos de las componentes de módulos fotovoltaicos:

Tabla 1: Matriz de impacto de las componentes de módulos fotovoltaicos.³

	Impacto por unidad de módulos FV dispuestos
Contaminación del suelo y aire	
Filtración de plomo	75 a 518 g/ton de módulo FV
Filtración de cadmio	27 a 153 g/ton de módulo FV
Pérdida de recursos	
Vidrio	
Vidrio en módulos en base a silicio	73.4 g/Wp ⁴

³ Fuente: Elaboración propia en base a (European Commission DG ENV, 2011)

⁴ Wp: Watt peak, es una unidad para indicar la potencia teórica de un módulo fotovoltaico.

Vidrio en módulos capa fina (CdTe)	237.1 g/Wp
Aluminio	
Aluminio en módulos en base a silicio	10.7 g/Wp
Aluminio en módulos capa fina (CdTe)	0.1 g/Wp
Metales raros	
Plata en módulos en base a silicio	0.9 g/Wp
Plata en módulos capa fina (CdTe)	2.5 g/Wp

Asimismo, cabe señalar que tal como se abordó a lo largo del estudio, existen materiales con una baja participación en peso del total de módulo, lo que dada su baja concentración influirá en la cuantía del impacto ambiental que podrían originar en caso de un. A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla.

Tabla 2: Resumen de impacto de componentes de módulos fotovoltaicos por tecnología

Componente	Tipo módulo	Impacto ambiental	Peso por módulo (kg)	Participación en peso
Plomo	Cristalino	<p>Humanos Daño al sistema nervioso, función renal, sistema inmune, sistemas reproductivos y al sistema cardíaco.</p> <p>Ecosistema Pérdidas en la biodiversidad, disminución en el crecimiento de individuos y bajas en las tasas de reproducción de plantas y animales, junto con efectos neurológicos en vertebrados.</p>	0.022	0.1%
Cadmio	Capa Fina	<p>Humanos Cancerígeno y causante de cambios fisiopatológicos graves.</p> <p>Ecosistema Acumulación en organismos vivos, con una vida media biológica de 30 años</p>	0.002	0.005%
Vidrio	Cristalino	Pérdida de recursos	15.5	77.5%
Vidrio	Capa Fina	Pérdida de recursos	32	88.9%
Aluminio	Cristalino	Pérdida de recursos	2.2	11%
Aluminio	Capa Fina	Pérdida de recursos	3	8.3%
Plata	Cristalino	Pérdida de recursos	0.0013	0.0065%

4 Propuesta de alternativas de tratamiento

A lo largo del estudio y del análisis de las temáticas estudiadas, se ha dado cuenta de que los módulos fotovoltaicos son un caso particular dentro de los AEE. Su uso, su larga vida útil, su mercado más asociado a los commodities, hacen que estos requieran de un enfoque particular para su tratamiento al final de su vida útil.

En el presente capítulo, se aborda una propuesta de alternativas de tratamiento de módulos FV, tomando como base las diversas soluciones existentes y disponibles en Chile.

4.1 Soluciones posibles en Chile para el tratamiento de módulos FV

Las alternativas de tratamiento y reciclaje de los elementos constituyentes de módulos FV plantean un creciente desafío tanto en Chile como en el mundo.

En el presente resumen se presentan las tecnologías para el tratamiento de módulos fotovoltaicos existentes hoy en el mundo y aquellas presentes en Chile. Cabe señalar que la razón de incluir la totalidad de las alternativas dice relación a que nada impide, a priori, que estas no estén disponibles en Chile en el futuro, máxime cuando el desafío de valorización de los volúmenes de residuos será importante.

La mayoría de los esfuerzos relacionados con el reciclaje de módulos FV tienen como objetivo recuperar y reciclar las partes más importantes y de mayor valor de los materiales constituyentes. Como se indicó anteriormente, actualmente existen tres tipos diferentes de procesos de reciclaje aplicados a los módulos FV: físicos, térmicos y químicos.

En general, el proceso de reciclaje de los módulos fotovoltaicos comienza con la extracción manual del marco de aluminio y la caja de conexiones. Para el proceso de delaminación, la remoción o eliminación del EVA es el primer paso. La eliminación de la capa de EVA ha sido reconocida como uno de los pasos más desafiantes en el reciclaje de módulos fotovoltaicos en base a silicio. Los distintos tratamientos y tecnologías de reciclaje utilizadas buscan indistintamente la separación y obtención de materia prima para otros procesos o productos, y/o la recuperación de la unidad funcional del módulo FV, esto es la celda FV, para su posterior reutilización en nuevos módulos.

Tabla 3: Matriz de comparación de las distintas alternativas evaluadas en el presente estudio⁵

OBJETIVO	TRATAMIENTO	PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	MATERIALES RECUPERABLES
SEPARACIÓN DE COMPONENTES ⁶	Mecánico	Separación mecánica húmeda o seca	Proceso simple que no incluye solventes químicos	No se logra la remoción y separación de algunos de los componentes	Marco de aluminio
			Bajo consumo energético	Se requieren de otros procesos si se quiere reciclar otros materiales o componentes	Caja de conexión y conductores
			Los materiales separados se pueden incorporar a flujos establecidos de reciclaje		Vidrio molido
	Químico	Lixiviación	Equipamiento ubicuo, no necesariamente especializado		Mezcla de sílice con metales y/o plástico
			Proceso efectivo y simple	Alto consumo de energía	Cobre, estaño y otros metales
			Recuperación de materiales de alta pureza	Uso de elementos químicos peligrosos	Vidrio
Mecánico	Desintegración física y trituración	Eficiente como gestión de residuos	Mezcla de varios materiales	Vidrio en parte sigue combinado con el EVA	Sílice de baja calidad
DELAMINACIÓN ⁷	Químico	Disolución orgánica	Capa orgánica removida del vidrio	Tiempo de delaminación depende del volumen	Celda fotovoltaica
			Reúso del residuo químico	Equipo y maquinaria de alto costo	
	Térmico	Combustión	Remoción simple del EVA	Uso de elementos químicos peligrosos	Vidrio y fracciones metálicas
			Eliminación total del EVA	Alto consumo de energía	
		Possibilidad de reusar las	Emisiones contaminantes		

⁵ Fuente: Elaboración propia, en base a (Chowdhury, y otros, 2020)

⁶ Fuente: (Shin, Park, & Park, 2017); (Granata, Pagnanelli, Moscardini, Havlik, & Toro, 2014) (Latunussa, Ardente, Blengini, & Mancini, 2016)

⁷ Fuente: (Shin, Park, & Park, 2017); (Monteiro, Alvarez-Gaitan, Bilbao, & Corkish, 2018); (Doi, y otros, 2001); (Maurer & Schlummer, 2004); (Bruton, 1994); (Suys, 2010); (Wang, Hsiao, & Du, 2012); (Kim & Lee, 2012)

PURIFICACIÓN DE MATERIAL⁸	Óptico	Irradiación ultrasónica	celdas FV	(por quema de plástico)	Vidrio
			Usado como proceso suplementario para acelerar la disolución	Proceso muy costoso	
			Remoción del EVA sencilla	Se requiere tratamiento posterior	
	Químico	Hidrometalurgia	Aplicable comercialmente	Numerosos pasos de separación y absorción	Aluminio, vidrio, cobre, sílice (grado metalúrgico), plata
			Emisiones bajas y controladas	Los pasos del proceso deben adaptarse a la tecnología respectiva	
			Fácil manejo y recirculación de agua	Se necesita un alto valor de materiales para que sea comercialmente atractiva	
Térmico	Pirometalurgia	Proceso industrial bien extendido	Se necesita un alto valor de materiales para que sea comercialmente atractiva	Vidrio, celda FV	
		La materia prima puede contener diferentes materiales	Algunos materiales se pierden en la escoria		
			Se generan metales pesados o materiales no deseados		

4.1.1 Separación de componentes

⁸ Fuente: (Suys, 2010); (Tao & Yu, 2015); (Doni & Dughiero, 2012)

Separación Mecánica:

En Chile, la separación mecánica en forma manual es utilizada en forma frecuente como primer paso para un reciclaje de mayor valor. Si bien en Europa la separación manual para la selección de residuos ha ido disminuyendo por la incorporación de tecnología y automatización, todavía existen para varios residuos, incluidos los RAEE. En Chile, plantas como Degraf, Midas, Reciclajes Industriales (Metalum), tienen líneas de desensamblaje manual, que en ocasiones requiere de cortes o rupturas de parte del aparato, y que permite la valorización de elementos metálicos, principalmente y el descarte de otros elementos como baterías y plásticos que hoy en día van a rellenos de seguridad.

Lixiviación:

La lixiviación es el proceso de extracción de un componente soluble a partir de un sólido por medio de un disolvente. La Lixiviación es un método muy común en Chile, pero casi exclusivamente dentro del ámbito minero. Básicamente, consiste en recuperar los metales mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico. En Chile la lixiviación seguida de electrolisis es una técnica utilizada a gran escala para la recuperación de Cobre residual. No existe experiencia en Chile que utilice esta técnica como parte de un proceso de separación de residuos de estas características. No obstante, lo anterior, la lixiviación, como parte del proceso hidrometalúrgico, sí se utiliza a menor escala para la purificación y obtención de elementos reciclados.

4.1.2 Delaminación

Desintegración Física y Trituración:

El proceso de desintegración física mediante trituración existe en Chile, sin embargo, no es común su utilización en RAEE. Debido a que el método de trituración no es selectivo y que la infraestructura es accesible, se considera una tecnología presente en el país. Existe un proyecto de reciclaje de módulos FV en Chile llevada a cabo por Solarix⁹ que consideraría la utilización de este proceso para aumentar la valorización de módulos FV.

Disolución Orgánica y por Ácido Nítrico:

Se desconoce hasta el momento si existen proceso de disolución orgánicas o por ácido nítrico en el país que pudieran ser adaptados para la delaminación de los módulos FV.

Combustión:

El uso de combustión como método de separación se ha utilizado en algunas de los desarrollos experimentales o experiencias piloto. En Chile no existe una experiencia relacionada con su uso para separación de módulos FV u algún otro RAEE. Si bien es un método con probado resultado, su alto consumo de energía y alta emisión de contaminantes al medio limita su potencial desarrollo.

⁹ <http://www.solarix.cl/blog/1era-planta-de-reciclaje-de-paneles-en-chile>

Irradiación ultrasónica:

Es un método que todavía está en fase experimental en el mundo, utilizado por una sola planta piloto. De acuerdo con lo comunicado por PV Cycle en la respectiva entrevista sostenida, este método todavía no muestra resultados que sean escalables a nivel industrial.

4.1.3 Purificación

Hidrometalurgia:

El proceso hidrometalúrgico más importante es la lixiviación, en la cual los metales que se desean extraer se disuelven selectivamente. Si el compuesto es soluble en agua, entonces el agua resulta ser un buen agente para la lixiviación, pero, en general, para la lixiviación se utiliza una solución acuosa de un ácido, una base o una sal. Una vez que todos los metales se encuentran disueltos en una solución acuosa de ácido sulfúrico, se debe extraer aquel metal de interés. Para esta etapa se utiliza, en general, una extracción con un solvente especial. Dicho solvente debe ser orgánico, de modo que cuando se pone en contacto con la fase acuosa, extrae inmediatamente el metal y forma una fase insoluble en la solución, como si fuera agua y aceite. La purificación del metal se efectúa mediante electrolisis, proceso por el cual se puede obtener los metales en estado metálico.

La hidrometalurgia ha tenido un incipiente desarrollo en Chile asociado a investigación de nuevas técnicas de procesamiento de minerales, principalmente cobre. Esta metodología tiene varias ventajas que la hacen atractiva y de mayor factibilidad en un escenario de requerimiento de reciclaje de mayor valor de módulos FV. Esta metodología está en una fase de pilotos llevado a cabo en Chile por Ecoproject y Recybatt asociado al reciclaje de pilas y acumuladores. A esto se suma el proceso experimental que investigadores de la Universidad Autónoma y Midas han realizado. Si bien la hidrometalurgia para la obtención de metales valorizables ha estado orientado a las pilas y acumuladores, es un método adaptable a otro tipo de componentes como celdas FV.

Pirometalurgia:

Si bien la pirometalurgia es un método que genera pasivos ambientales importantes debido a la combustión de fracciones residuales que se quieren eliminar, esta se utiliza en Chile como parte del reciclaje de metales y por lo tanto tienen la potencialidad de adaptarse para la recuperación de elementos de las celdas FV. Una de las plantas que tiene un proceso pirometalúrgico no minero de recuperación de plomo de baterías de autos es Recimat en el norte de Chile (2da Región). Midas y Metalum en Chile también tienen hornos donde recuperan algunos metales provenientes de otras aplicaciones dentro de las que se encuentran RAEE.

4.2 Escenarios al final de la vida útil de módulos FV

Uno de los puntos cruciales a la hora de abordar el tratamiento de los módulos fotovoltaicos, tiene relación con la determinación de la vida útil efectiva que tienen estos y cuando dejan de estar operativos. En este sentido, se abordan diversos análisis en cuanto a su vida útil y posteriormente se exponen diversos escenarios de generación de residuos de módulos FV en el tiempo.

4.2.1 Vida útil informada por productores

Los productores de módulos fotovoltaicos, para las distintas variedades de módulos que ofrecen, solo especifican los años de garantía de tales equipos. Esta tiene por objetivo garantizar que la tasa de degradación del rendimiento de los módulos no superará ciertos valores durante un período de tiempo determinado, como un porcentaje de la potencia nominal de salida de estos en el momento de su instalación. Asimismo, los productores entregan otra garantía, la cual responde a posibles desperfectos de fabricación que pudiesen tener los módulos fotovoltaicos en el corto plazo (no funcionamiento, componentes en mal estado, entre otros).

En relación con esto, a continuación, se muestran los años de garantía establecidos por algunos productores en cuanto al rendimiento de salida de los módulos fotovoltaicos y los años de garantía con respecto a desperfectos de fabricación:

Tabla 4: Condiciones de garantía entregados por productores de módulos FV¹⁰

PRODUCTOR	AÑOS DE GARANTÍA DE RENDIMIENTO	RENDIMIENTO AL FINAL DE LA GARANTÍA	AÑOS DE GARANTÍA DESPERFECTOS FABRICACIÓN
TRINA SOLAR	25	80.7%	10
JINKO	25	80.2%	10
YINGLI SOLAR	25	80.2%	10
CANADIAN SOLAR	25	83.1%	15
FIRST SOLAR¹¹	25	80%	10

Como se puede observar, es prácticamente un estándar de la industria de módulos fotovoltaicos garantizar su rendimiento por un período de 25 años, con valores superiores al 80%. Asimismo, la garantía para efectos de desperfectos de fabricación es de 10 años en 4 de los 5 productores

¹⁰ Fuente: Condiciones oficiales de garantía de cada productor. Obtenidas de folletos técnicos de cada módulo ofrecido por las empresas señaladas.

¹¹ Módulos Capa Fina (CdTe)

analizados, con la excepción de la empresa Canadian Solar que ofrece una garantía de 15 años en la materia.

Este hecho, indica el alto estándar que poseen los módulos fotovoltaicos de 5 de los productores más importantes de la industria a nivel mundial¹², entregando módulos con una baja tasa de fallas. En las entrevistas sostenidas durante la consultoría con tales empresas productoras de módulos fotovoltaicos, los productores señalaron los desperfectos de fabricación son mínimos, no obstante, tal información es confidencial por parte de las empresas.

En relación con lo anterior, cabe señalar que en los folletos técnicos y de acuerdos de garantía de los diversos módulos fotovoltaicos, mencionan que, si bien la garantía al rendimiento de los módulos se encuentra especificada y es de 25 años¹³, estos pueden seguir operando sin problemas posterior al final la garantía con un rendimiento superior al 80%.

4.2.2 Vida útil declarada por proyectos fotovoltaicos en Chile

En cuanto a los proyectos fotovoltaicos en Chile, algunos de ellos informan la vida útil que estiman para su funcionamiento. Esta información es entregada, según corresponda, en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto. Asimismo, cabe señalar que 116 de los proyectos fotovoltaicos Gran Escala, Pequeños Medios de Generación (PMG) y Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD) en funcionamiento a marzo de 2020, no informan en su respectiva DIA o EIA la vida útil que estiman para su funcionamiento¹⁴. En contrapartida, 77 proyectos si reportan su vida útil, coincidiendo con los proyectos de mayor tamaño (Gran Escala) y, por ende, número de módulos.

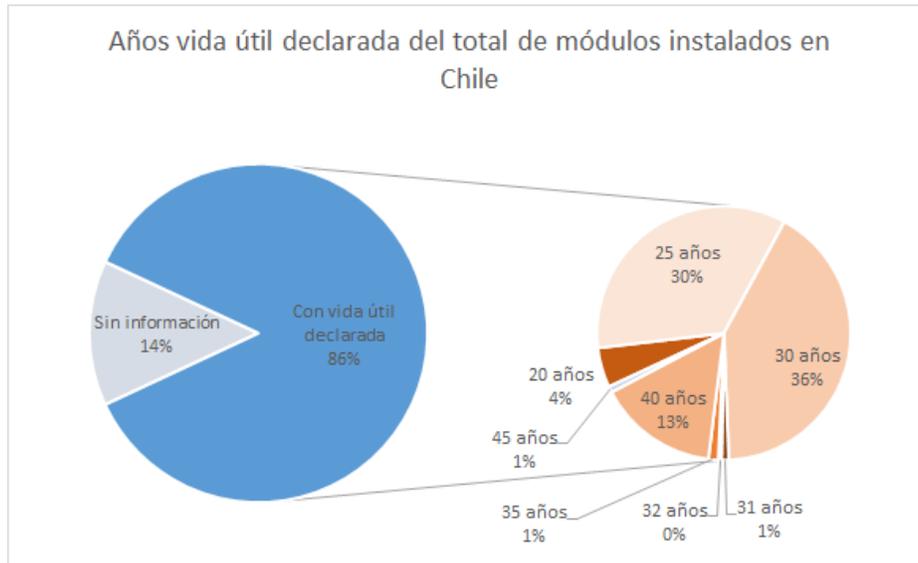
En esta línea, tal como se observa en la siguiente figura, del total de módulos fotovoltaicos asociados a proyectos Gran Escala, PMG y PMGD instalados en Chile (193), un 14% de los módulos no tiene informada su vida útil en la respectiva DIA o EIA del proyecto. Asimismo, de los módulos asociados a proyectos fotovoltaicos que tienen informada su vida útil, más del 50% tienen más de 30 años de vida útil, incluso algunos llegando a 40 años y 45 años.

¹² Fuente: (PV Magazine, 2018)

¹³ Por ejemplo, en el acuerdo de garantía de la empresa productora de módulos fotovoltaicos Trina Solar, se menciona (traducción al español): Garantía Limitada de 25 años de la potencia de salida – Trina Solar garantiza por un período de 25 años comenzando en la fecha de inicio de la garantía, una pérdida en la potencia de salida (...) que para los módulos policristalinos es 2.5% en el primer año, posteriormente será de 0.7% por año, finalizando con 80.7% en el año 25.

¹⁴ Cabe aclarar que los proyectos del tipo Netbilling descritos en el Informe 1 de la consultoría, no deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, por lo que no son contabilizados para esta estadística.

Figura 2: Participación del número de módulos fotovoltaicos según la vida útil declarada de los proyectos respectivos a marzo de 2020.¹⁵



Cabe señalar que la información declarada en las respectivas DIA o EIA en cuanto a la vida útil de los proyectos, no entrega mayores antecedentes en base a que criterio es calculada, en cuanto a si corresponde a un cálculo financiero, ambiental o técnico.

4.2.3 Vida útil financiera de módulos fotovoltaicos

En cuanto a la vida útil de los proyectos estimada para fines de evaluación económico-financiera de los proyectos, es un dato que no se encuentra disponible de forma pública, pero que, dada la experiencia del equipo consultor, se acerca a los valores de garantía informados por los productores. En este sentido, se ha podido observar que las empresas evalúan la rentabilidad del proyecto considerando una vida útil de 20 a 25 años de las instalaciones, con la respectiva depreciación del activo fijo.

Junto a lo anterior, en las evaluaciones financieras de proyectos fotovoltaicos que se instalan en el país se estima que el funcionamiento de los módulos no requiere la realización de mantenimientos mayores, tal como ocurre en otros medios de generación eléctrica. Esto implica que en la evaluación no se consideran costos asociados a reinversión o refacción de la central en el período considerado.

Por último, cabe señalar que los proyectos fotovoltaicos, en base a la experiencia que miembros del equipo consultor en la evaluación financiera de proyectos, tienen un retorno sobre la versión

¹⁵ Fuente: Elaboración propia en base información del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

en torno a los 10 años para el caso de proyectos Gran Escala, PMG y PMGD, dependiendo de las condiciones contractuales, del precio de venta de la energía y de la radiación solar del lugar de emplazamiento.

4.2.4 Proyecciones de generación de residuos generales de módulos fotovoltaicos

En vista de los puntos anteriores, el concepto de vida útil de los módulos fotovoltaicos es amplio y no existe claridad en qué período de tiempo estos dejan de operar por una degradación natural de sus componentes. Esta información, tal como se mencionó, tampoco es reportada por los mismos productores, en cuanto a que, según mencionaron en las entrevistas sostenidas, no existe evidencia empírica de que módulos fotovoltaicos en base a la tecnología actual de silicio hayan llegado al fin de su vida útil y detenido su producción dado que se degradaron completamente.

Asimismo, los primeros proyectos fotovoltaicos puestos en funcionamiento en el país se remontan al año 2012, y donde los productores que tienen conocimiento de la realidad de estos, mencionaron que no han presentado desperfectos en su funcionamiento o caídas considerables en su eficiencia. En particular, la central fotovoltaica Tambo Real de 3 MW corresponde al primer proyecto que entró en operación inyectando energía al Sistema Eléctrico Nacional (año 2012). Asimismo, según lo reportado por la Comisión Nacional de Energía, aún no existen plantas solares fotovoltaicas de Gran Escala, PMG y PMGD que hayan salido de funcionamiento.

Teniendo estos antecedentes y la amplitud de criterios para el establecimiento de la vida útil de los módulos y proyectos fotovoltaicos, es que se establecieron dos casos de estudio. El primero considera la proyección de módulos fotovoltaicos en Chile que llegarán al final de su vida útil en base a lo señalado por los productores de estos, y el segundo caso corresponde al fin de la vida útil de los módulos desde el punto de vista financiero.

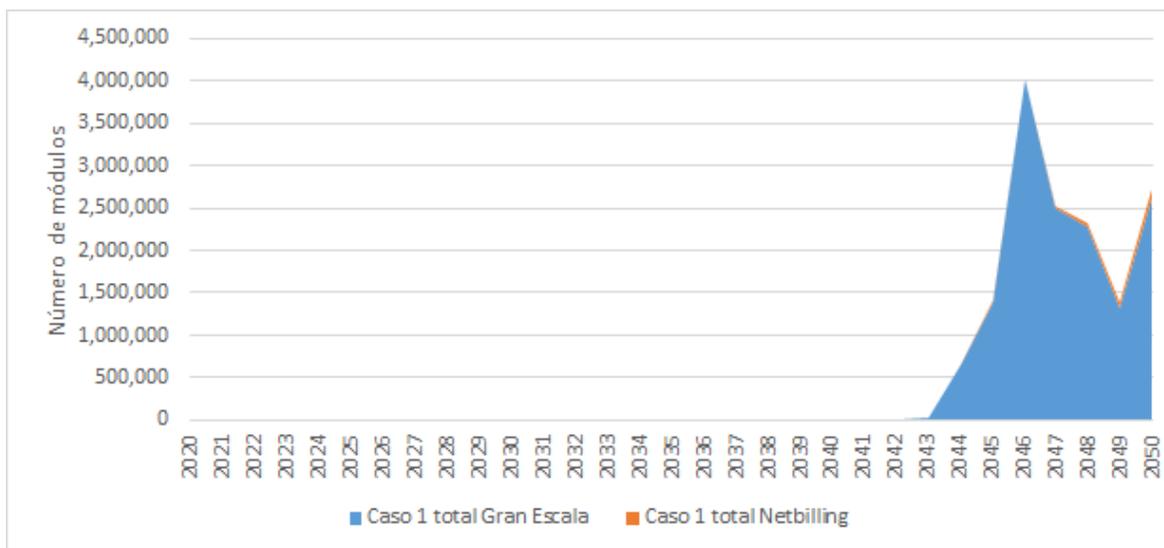
Cabe señalar que los casos estudiados solo representan parte de un abanico de futuros de escenarios, los cuales fueron tomados desde lo desarrollado en el informe 1 en cuanto a la proyección de módulos fotovoltaicos instalados en Chile. Asimismo, como anexo se dispone de la planilla de cálculo que permite variar ciertos parámetros para determinar otros casos según se desee.

4.2.4.1 Caso 1: 30 años de vida útil

El primer caso considera que los módulos fotovoltaicos en Chile tendrán una vida útil de 30 años desde el momento en que entra en operación el proyecto respectivo. Asimismo, este caso considera la proyección de capacidad instalada fotovoltaica del escenario E del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2020). Por último, contempla que los módulos fotovoltaicos que se instalarán a futuro en el país son cristalinos y unifaciales.

En la siguiente figura se muestra la proyección anual de módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil para el caso 1, desagregada entre proyectos de gran escala (incluyendo PMGD y PMG) y del tipo netbilling.

Figura 3: Proyección de módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil en Chile (caso 1)¹⁶



Como se observa, en este caso la aparición de módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil comienza recién el año 2043, dado que los primeros proyectos fotovoltaicos entraron en operación en el año 2012. Asimismo, se tiene que el peak de módulos fotovoltaicos que llegarían al fin de su vida útil se alcanza en el año 2046, teniendo cerca de 4 millones de estos. De tales módulos, casi 3 millones provienen de dos proyectos fotovoltaicos que se encuentran actualmente en operación: Luz del Norte (141 MW) y PFV Carrera Pinto (93 MW), ambos en la región de Atacama, comuna de Copiapó.

El hecho de que la mayor cantidad de módulos fotovoltaicos se produzca en una misma región e inclusive en la misma comuna, podría traer grandes desafíos en cuanto a la logística de recolección y almacenamiento de estos. En contrapartida, también se tienen los módulos netbilling que llegarían al final de su vida útil, los cuales, tal como se observa en el gráfico, corresponden a un volumen menor en comparación: cerca de 160 mil en total entre los años 2045 y 2050.

Además, cabe señalar un punto no menos importante, dado que, si bien en las proyecciones de módulos fotovoltaicos que llegan al final de su vida útil, para este caso, se observa que a partir del año 2042 se tienen volúmenes relevantes, en los años previos igualmente se tendrán módulos que salgan de operación.

Aquellos módulos, tal como lo aborda IRENA en su reporte (IRENA, 2016), están asociados a un caso de “early loss” o pérdida temprana de ellos, ya sea por desperfectos de fabricación, rotura

¹⁶ Fuente: Elaboración propia

por instalación incorrecta o una mala manipulación en su transporte, entre otros, en donde tal organismo asume que se pierden un 1% de los módulos antes de la entrada en operación de la planta. No obstante, según lo comentado por las empresas productoras de módulos fotovoltaicos entrevistadas con objeto de este estudio, indicaron que los módulos que presentan desperfectos de fabricación son devueltos inmediatamente a los países de fabricación con la finalidad de hacer uso de la respectiva garantía, lo cual evita que el módulo con desperfectos se disponga finalmente en Chile. En cuanto a problemas en el traslado de módulos fotovoltaicos previo a la instalación de estos, teniendo como consecuencia la causa de desperfectos en estos, según las empresas productoras es una situación poco común dadas las condiciones de transporte de estos (pallets sellados en containers dedicados).

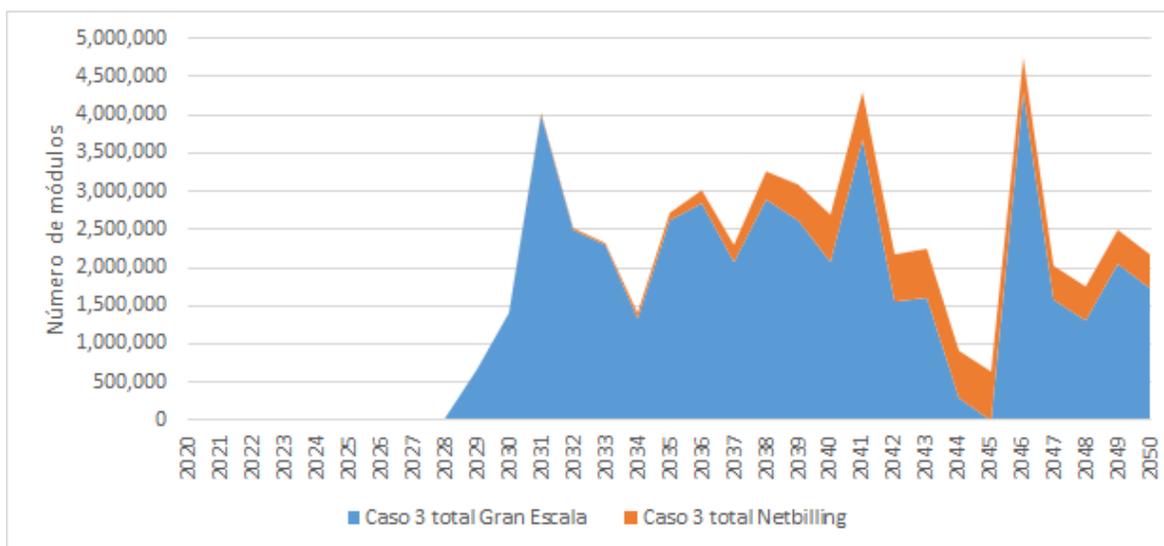
En vista de lo abordado en este capítulo es que en las secciones 4.3 y 4.4, se realiza un análisis de los desafíos que impone el volumen de módulos fotovoltaicos que llegan al final de su vida útil, en cuanto a su transporte, almacenamiento y tratamiento respectivo.

4.2.4.2 Caso 2: 15 años de vida útil

El segundo caso analizado, considera que las empresas una vez que alcancen el período de retorno de la inversión de los proyectos fotovoltaicos de Gran Escala, PMG, PMGD y Netbilling, realizarán una renovación de sus activos por otros de mayor eficiencia disponibles en el futuro. El período de fin de vida útil para este caso se consideró de unos 15 años desde el momento de la entrada en operación de los proyectos fotovoltaicos. Además, en la proyección se tomó en cuenta el escenario E del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2020). Por último, contempla que los módulos fotovoltaicos que se instalarán a futuro en el país son cristalinos y de una cara.

En la siguiente figura se muestra la proyección anual de módulos que llegan al final de su vida útil para el caso 2, desagregada entre proyectos de gran escala (considerando PMG y PMGD) y del tipo netbilling.

Figura 4: Proyección de módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil en Chile (caso 2)¹⁷



Tal como se observa, en este caso se tiene que los módulos que llegan al final de su vida útil en el país comienzan a aparecer a partir del año 2027, observándose el mismo peak que en el caso anterior de cerca de 4 millones de módulos se adelanta al año 2031. A su vez, se observa otros peaks de módulos que llegan al final de su vida útil en los años 2041 y 2046, con más de 4 millones cada uno.

Por otra parte, dado que en este caso se adelanta el fin de la vida útil de los módulos fotovoltaicos, comienza a aparecer una importante participación de módulos provenientes de proyectos netbilling y que pudiesen ser dados de baja, esto a partir del año 2035.

Este caso en particular tiene implicancias diferentes al caso 1, debido a que, al considerar una vida útil de 15 años para los módulos fotovoltaicos, estos se encuentran aún con muy buenos índices de eficiencia de la potencia entregada. Por ejemplo, la empresa productor Yingli Solar señala en sus condiciones de garantía, que al cabo de 15 años la eficiencia de sus módulos alcanza un 87.2% (Yingli Solar, 2017).

Dada esta situación, y tal como se aborda en las siguientes secciones, en este caso los módulos pueden seguir operando con un nivel de eficiencia considerable, por lo que podrían reutilizarse ingresando nuevamente al mercado. Este tipo de enfoque es analizado a modo de propuesta en el respectivo apartado en el informe, dado que representa una oportunidad para expandir la penetración de la generación eléctrica mediante energía solar en el país, además de reducir la generación de residuos asociados a los módulos fotovoltaicos.

¹⁷ Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Proyección de generación de residuos en detalle de módulos fotovoltaicos

En el siguiente capítulo se ha detallado la proyección de residuos respecto a la tecnología, el tipo de proyecto y los componentes y materiales de los módulos FV.

4.2.5.1 *Consideraciones base para la proyección de generación de residuos:*

Para las proyecciones de la generación de residuos se han incorporado las siguientes consideraciones derivadas de los resultados del estudio hasta ahora.

La proyección de residuos hasta el año 2050 es una estimación respecto a la instalación fotovoltaica real entre los años 2012 y 2020. Ese período responde al supuesto de duración de vida de los módulos FV de 30 años. Para un cálculo posterior al año 2050 se requiere estimar los residuos en base a las proyecciones del proceso PELP del Ministerio de Energía.

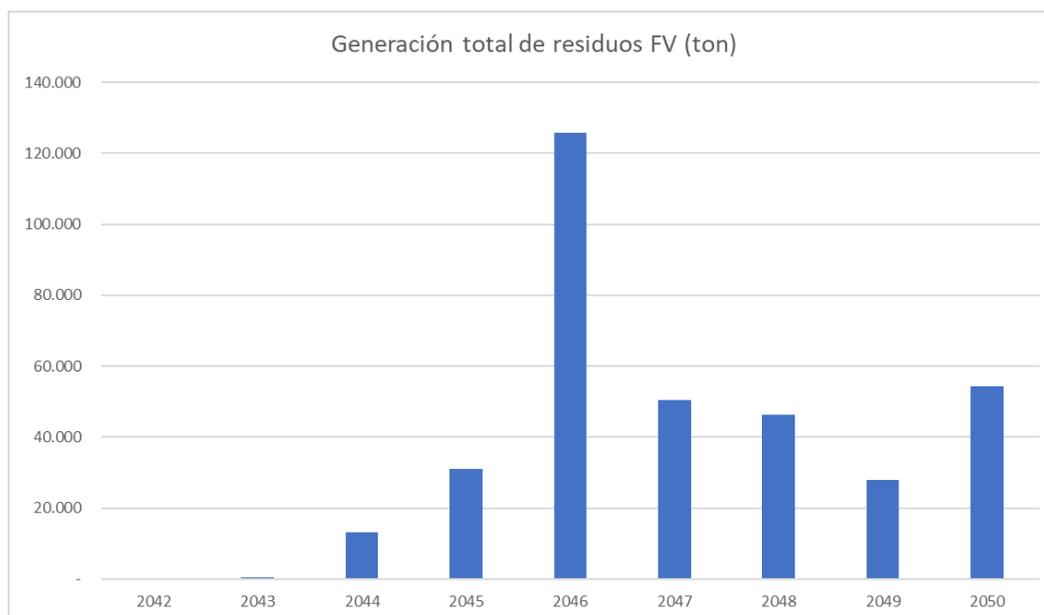
Debido a que las proyecciones de generación de residuos son hasta el año 2050 (Caso 1) sólo se incorporan módulos de silicio unifícales, debido a que los bifaciales se proyecta se instalen en el futuro, no generando residuos con anterioridad al año 2050, considerando una vida útil de 30 años. De la tecnología de Capa fina solo se proyectan residuos en 2 años (2045 y 2046), dado a que en estos años los únicos 5 proyectos que se han instalado en el país cumplen los 30 años proyectados, y no se sabe si esta tecnología seguirá siendo implementada en el país. En las proyecciones PELP solo se considera la tecnología de silicio.

4.2.5.2 *Proyecciones de generación de residuos en detalle*

Proyecciones de generación de residuos en general:

En base del Caso 1 se van a generar los siguientes totales de residuos de módulos FV por año:

Figura 5. Generación total de residuos FV para el período 2042 – 2050 (ton)¹⁸



De acuerdo con la proyección de generación de residuos en base al Caso 1 analizado, se generan las siguientes cantidades anuales de residuos por tipo material y por tipo de proyecto:

Tabla 5: Generación total de residuos de módulos FV acumulados para el período 2042 – 2050

	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
TOTAL RESIDUOS (TON)	193	682	13,754	44,888	170,561	220,934	267,292	295,236	349,613

Un primer peak de los residuos se proyecta para el año 2046 con más que 120.000 toneladas de residuos, cuando los grandes proyectos instalados en el año 2016 cumplen 30 años de vida útil.

Principalmente la idea es que estos volúmenes de residuos se gestionan de forma adecuada a corto plazo y se evita una acumulación. Sin embargo, en la siguiente tabla se presentan estos volúmenes de forma acumulada desde el año 2042.

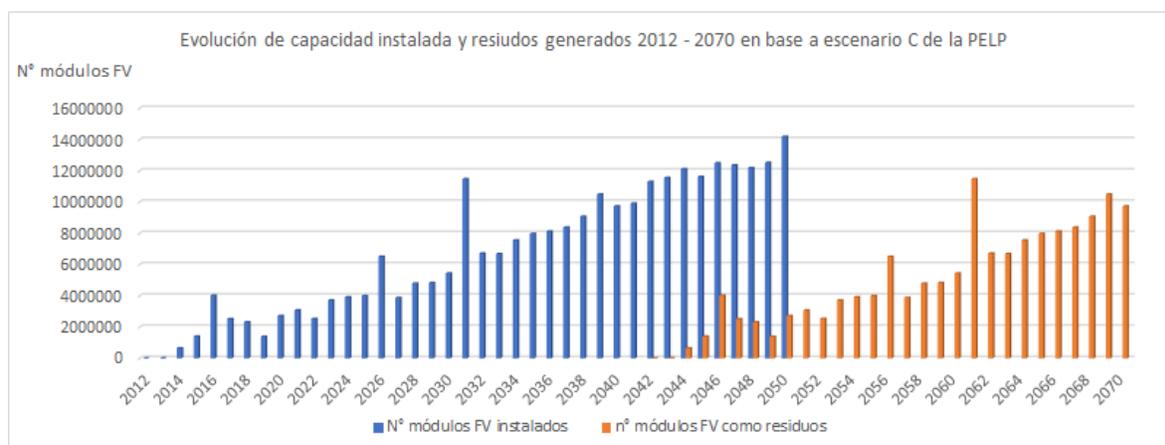
¹⁸ Fuente: Elaboración propia

Proyecciones de generación de residuos en general más allá del año 2050:

Como se ha mencionado con anterioridad, debido a que la vida útil de los módulos FV podría ser de 25 a 30 años, su aumento exponencial es proporcional al de los futuros residuos fotovoltaicos, incluso si dichos residuos aparecen con un desfase prolongado. Esta cifra se traduce a que de los residuos fotovoltaicos no se han informado ampliamente hasta hace poco. Los módulos instalados a fines de la década de 1980 y principios de 1990 recién ahora están comenzando a llegar al final de su vida útil, lo que resulta en una rápida acumulación que se irá incrementando conforme comiencen a finalizar su vida útil las grandes plantas FV instaladas a partir de esa fecha. Si se considera una vida útil promedio del panel de 25 años (Chowdhury, y otros, 2020), se prevé que los residuos solares fotovoltaicos en todo el mundo alcancen entre el 4% y el 14% del equivalente en peso de la capacidad de generación total 2030, lo que aumentaría a más del 80% (alrededor de 78 millones de toneladas) para el año 2050.

En Chile, debido a que la instalación de módulos FV es más tardía respecto a otros países del mundo, del total de potencia fotovoltaica acumulada al 2050, y asumiendo una duración de 30 años de los módulos, usando el criterio de IRENA, en Chile se generaría como residuo el equivalente al 7.6% del total instalado en el escenario de menor instalación y 6.2% en el escenario de mayor instalación. Ahora bien, si los residuos de módulos FV se proyectan más allá del 2050, claramente, representarán un porcentaje mayor de la capacidad instalada para ese momento. Esto se produce por el desfase temporal entre la instalación y la generación de residuos. En un comienzo la brecha es mayor, pero tiende a reducirse con el tiempo. Después de poco más 30 años de uso, para el año 2050 se estima una acumulación de 300,000 toneladas de residuos de módulos FV, esta cifra tendría un crecimiento significativo al cabo de los 50 años de desarrollo fotovoltaico en Chile, llegando a una acumulación estimada en base a la proyección de la PELP para el año 2070 de 2,880,000 toneladas de residuos FV.

Figura 6: Evolución de capacidad instalada y residuos generados 2012 - 2070 (n° módulos FV)¹⁹

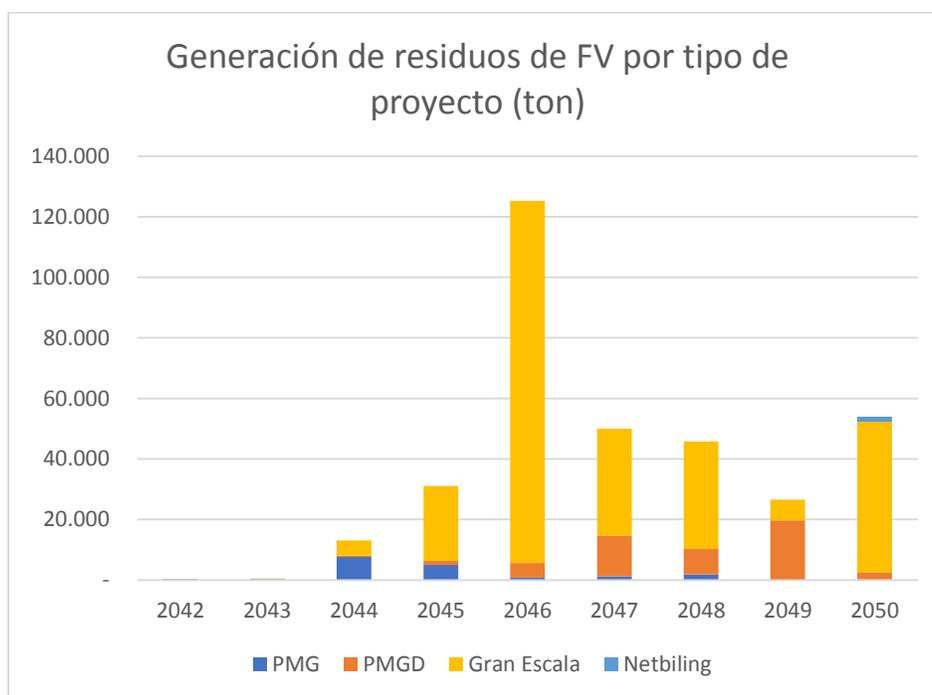


¹⁹ Fuente: Elaboración propia, en base a proceso PELP

Proyecciones de generación de residuos por tipo de proyecto:

Se presenta la generación total de residuos en base a los distintos tipos de proyectos: PMG, PMGD, Gran escala y Netbilling.

Figura 7: Residuos totales generados por tipo de proyecto en Chile (ton).



Se destaca que el primer peak de volúmenes de residuos proviene de mayor parte de los proyectos a gran escala. En la siguiente tabla se puede revisar los volúmenes anuales acumulados por tipo de proyecto desde el año 2042.

Tabla 6: Residuos totales anuales acumulados generados por tipo de proyecto en Chile (ton).

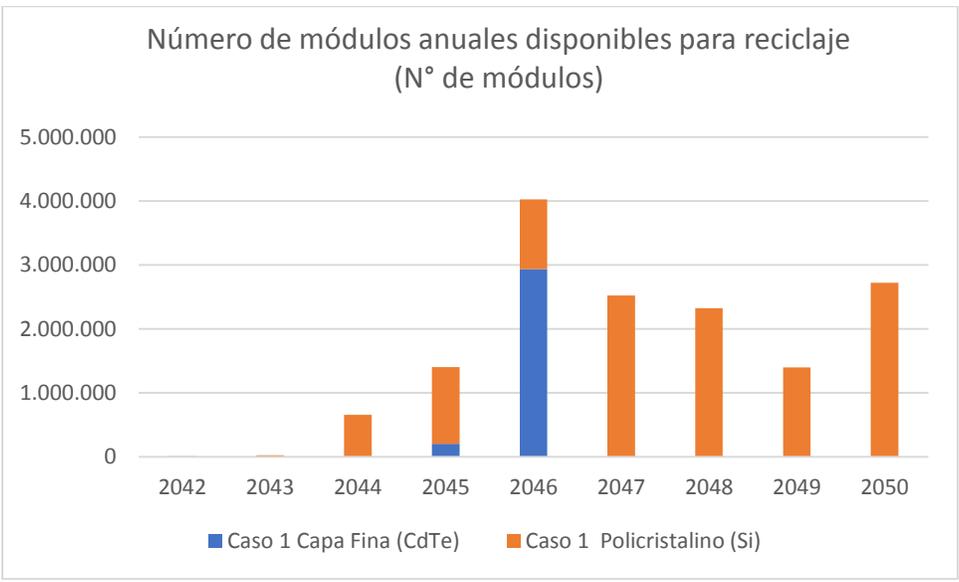
TIPO DE PROYECTO	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
PMG	-	272	7,900	12,926	13,722	14,927	16,808	16,808	17,005
PMGD	193	409	878	2,183	7,057	20,567	28,930	48,684	51,092
GRAN ESCALA	-	-	4,976	29,703	149,308	184,533	220,014	226,840	276,596

NETBILLING	-	-	-	-	-	-	-	-	1,540
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	-------

Proyecciones de generación de residuos por tipo de módulos y materiales:

En los siguientes gráficos se desagrega la proyección de residuos de módulos FV considerando la evolución en la generación de los distintos tipos de tecnologías de módulos FV y los materiales que se van a generar y que estarán disponibles para reciclaje o disposición.

Figura 8: Numero de módulos FV anualmente disponible para el reciclaje en Chile, Fuente: elaboración propia en base del Caso 1



Como se menciona en el apartado anterior, la mayoría de los módulos FV descartados serán en base a silicio y solo en los años 2045 y 2046 hay 1 y 4 proyectos respectivamente de módulos de capa fina en base a CdTe.

En el Informe 1 capítulo 4.2 se ha descrito en detalle la composición de los módulos FV por tecnología. Para las proyecciones de residuos por material se ha considerado los siguientes Masas de cada material:

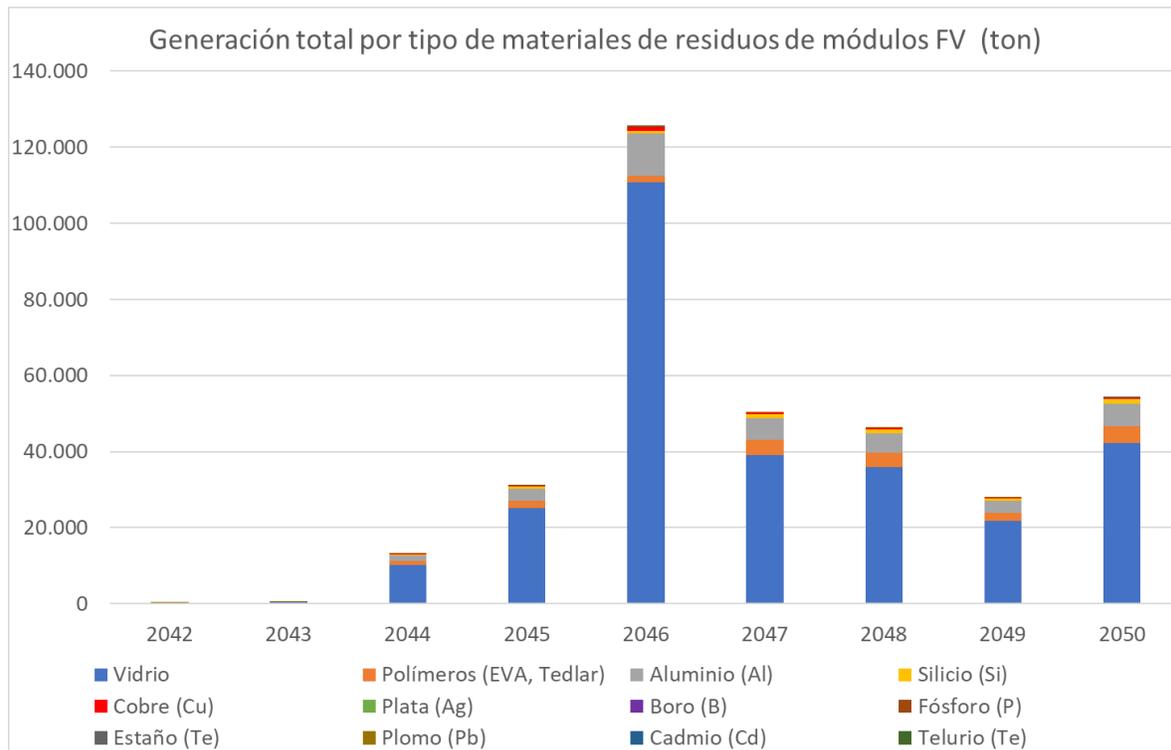
Tabla 7: Componentes y materiales de Módulos FV por tecnología en masa (kg), aproximación para un módulo referencial.²⁰

MATERIALES DE MÓDULOS FV	CRISTALINO UNIFACIAL	% DEL TOTAL	CAPA FINA (CDTE)	% DEL TOTAL
VIDRIO	15.50	77.60%	32.00	90.34%
POLÍMEROS (EVA, TEDLAR)	1.60	8.01%		
ALUMINIO (AL)	2.20	11.01%	3.00	8.47%
SILICIO (SI)	0.45	2.24%		0.00%
COBRE (CU)	0.13	0.67%	0.36	1.02%
PLATA (AG)	0.00	0.01%		
BORO (B)	0.02	0.11%		
FÓSFORO (P)	0.02	0.11%		
ESTAÑO (TE)	0.02	0.11%	0.02	0.06%
PLOMO (PB)	0.02	0.11%		
CADMIO (CD)			0.002	0.00%
TELURIO (TE)			0.039	0.11%
TOTAL DE RESIDUOS (KG)	20.0	100.00%	35.42	100.00%

A base de esta tabla se pueden estimar los volúmenes de materiales que contiene el total de los residuos de módulos FV proyectados:

²⁰ Fuente: (Sica, Malandrino, Supino, Testa, & Lucchetti, 2018)

Figura 9: Materiales contenidos en los residuos generados de módulos FV²¹



Tal como fue mencionado en los informes anteriores, los materiales mayormente presentes en los módulos son el vidrio, el aluminio y polímeros (plásticos), representados en esta figura por los colores celeste, naranja y gris, cuales suman a más que 95% del peso de un módulo FV, dependiendo de la tecnología y el fabricante del módulo. En la siguiente tabla se pueden ver los volúmenes anuales de residuos acumulados desde el año 2042.

Tabla 8: Proyección de generación de residuos (2042-2050) por tipo de material acumulados (ton).

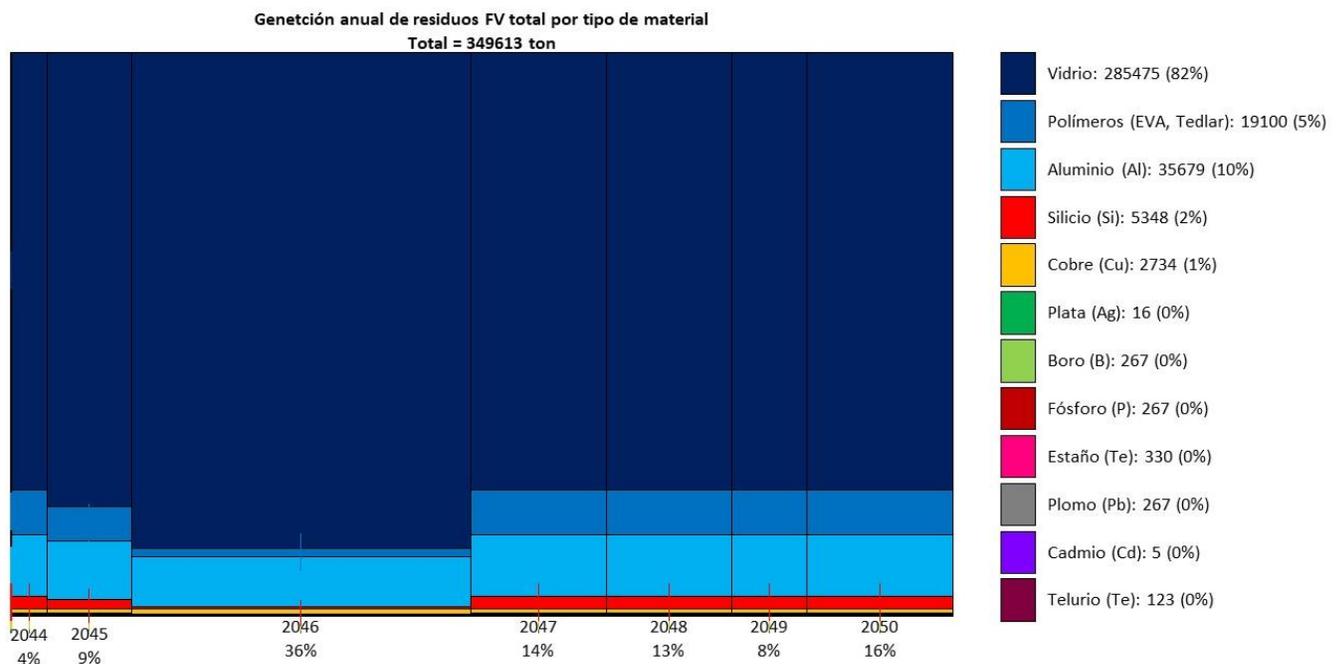
MATERIALES	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Vidrio	149	529	10,673	35,755	146,524	185,615	221,591	243,276	285,475
Polímeros (EVA, Tedlar)	15	55	1,102	3,017	4,757	8,792	12,506	14,744	19,100
Aluminio (Al)	21	75	1,515	4,760	15,957	21,506	26,612	29,690	35,679
Silicio (Si)	4	15	308	845	1,332	2,462	3,502	4,128	5,348
Cobre (Cu)	1	5	93	327	1,530	1,869	2,180	2,368	2,734
Plata (Ag)	0	0	1	2	4	7	10	12	16

²¹ Fuente: Elaboración propia.

<i>Boro (B)</i>	0	1	15	42	67	123	175	206	267
<i>Fósforo (P)</i>	0	1	15	42	67	123	175	206	267
<i>Estaño (Te)</i>	0	1	15	46	129	186	238	269	330
<i>Plomo (Pb)</i>	0	1	15	42	67	123	175	206	267
<i>Cadmio (Cd)</i>	0	0	0	0	5	5	5	5	5
<i>Telurio (Te)</i>	0	0	0	8	123	123	123	123	123
Total de Residuos (ton)	193	682	13,754	44,888	170,561	220,934	267,292	295,236	349,613

Para obtener una mejor visualización de los volúmenes de los distintos materiales en los residuos de los módulos FV en total y su distribución por año y material se ha desarrollado la siguiente figura:

Figura 10. Generación anual de residuos por tipo de material (ton)²²



²² Fuente: Elaboración propia

4.2.5.3 Volúmenes de residuos pronosticados en el Cono Sur:

En los países del Cono sur, Chile es el país con la mayor capacidad instalada y con mayor proyección en cuanto a capacidad instalada futura, como se puede apreciar de las estimaciones de la PELP del Ministerio de Energía.

En Argentina, debido a que recién están comenzando a introducir energías renovables no convencionales, las capacidades instaladas son bajas (441 MW en 2019)²³ en comparación con Chile. A pesar de que esta cifra es el doble del año anterior, no se han desarrollado proyecciones superiores a los 5 años.

En Uruguay la capacidad instalada está muy por debajo en comparación con Chile (200 MW en 2019)²⁴ y no se proyecta un crecimiento a corto plazo. Lo anterior se debe a que la matriz de energía de Uruguay cuenta con 98% de energías renovables, en base a capacidad hidroeléctrica y eólica. Es por esto que su proyección de instalación FV influye poco en las proyecciones de residuos de módulos FV en el Cono Sur.

En Perú, la capacidad instalada en el año 2019 fue de 341 MW, lo que cubre un 1,3% de su demanda de energía eléctrica. Estos son 4 MW menos que lo instalado el año 2018 (IRENA, 2020), cuando se inauguró la planta más grande del Perú que tiene una potencia de 145 MW. Este año se han aprobado dos nuevas plantas que suman aproximadamente 160 MW en conjunto²⁵. Sin embargo, con estas plantas todavía la capacidad instalada total es baja dentro del Cono Sur, y no se han elaborado proyecciones de residuos en base a estas cifras.

El estudio realizado por IRENA contiene las siguientes proyecciones para Ecuador y Brasil, las que suman 785,000 toneladas de residuos de módulos FV acumuladas al año 2050.

Tabla 9: Resultados modelados de los volúmenes de residuos acumulados estimados de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil por país (ton).²⁶

	2016	2020	2030	2040	2050
Chile	150	250	4000	S/I	S/I
Brasil	10	40	2,500	18,000	300,000
Ecuador	15	15	250	5,000	25,000
Total	25	55	2,750	23,000	325,000

²³ <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/04/07/america-latina-alcanza-los-13-gw-de-capacidad-fotovoltaica-instalada/>

²⁴ <https://www.pv-magazine.com/2019/04/05/uruguay-will-not-renounce-solar-energy/>

²⁵ <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/02/13/continua-energias-positivas-construira-160-mw-fotovoltaicos-en-peru/>

²⁶ Fuente: (IRENA, 2016)

Sin bien no se cuenta con mayor conocimiento respecto a la tecnología instalada de los proyectos de Brasil y Ecuador, se pueden comparar sus cifras con las proyecciones de Chile bajo las suposiciones del escenario Caso 1 elaborado en el punto 4.2. De esta forma se puede llegar a una estimación de volúmenes de residuos de módulos FV de 676,810 toneladas en total para el Cono Sur.

4.3 Propuesta de recolección, transporte y almacenamiento de módulos FV para Chile

Un programa de reciclaje viable para módulos solares requerirá una cuidadosa atención a las experiencias de comparables industrias y economía de recolección y materiales. La viabilidad básica de cualquier programa de reciclaje a menudo depende de la concentración geográfica de los bienes y su proximidad a las instalaciones de reciclaje apropiadas, y en su contenido de materiales valiosos. Los sistemas fotovoltaicos no están actualmente muy concentrados geográficamente. Los mercados actuales de energía fotovoltaica están dominados por instalaciones, tales como sistemas de energía on – grid para industrias y aplicaciones residenciales independientes y en sistema de gran escala, como los PMGD y plantas de generación mayores a 9 [MW]. Por lo tanto, la recolección, almacenamiento y transporte de módulos al final de su vida útil se presenta como un desafío.

4.3.1 Recolección

Podemos delinear tres escenarios base para establecer una infraestructura institucional que logre enfrentar los desafíos de recolectar y, subsecuentemente, reciclar los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil.

En el primer escenario, los propietarios de las grandes plantas de generación fotovoltaica, los cuales no necesariamente corresponden a los mismos productores de módulos, podrían ser responsables de hacerse cargo de la entrega de los módulos fotovoltaicos a las plantas de reciclaje al final de su vida útil. El reciclaje de los módulos podría estar integrado con otros programas, tales como programas de conservación y/o mitigación. Por ejemplo, podría tratarse del emplazamiento de una planta fotovoltaica en una localidad cercana a una comunidad, en donde se explicita claramente que al final de la vida útil del proyecto existirá la disposición final de los paneles para reciclaje.

En el segundo escenario, los productores y distribuidores podrían ser individualmente responsables por la recolección, consolidación y transporte de los módulos fotovoltaicos obsoletos a las plantas recicladoras. Esto podría involucrar a compañías de logística inversa, y el reciclaje podría ser llevado a cabo por recicladores de materiales y desarmadores que no estuvieran exclusivamente en el rubro de los sistemas fotovoltaicos. Los servicios de reciclaje podrían ser pagados por el generador, el productor, o por un fondo de garantía reservado al momento de comprar los módulos.

El tercer escenario plantea que los productores son colectivamente responsables por recolectar y transportar los módulos a los recicladores, probablemente a través de la incorporación a una entidad colectiva, por ejemplo, un sistema de gestión REP, que apoye el reciclaje de módulos. Los canales minoristas inversos y las entidades de consolidación pueden ser responsables de la recolección, consolidación y transporte, y los módulos serían reciclados por desarmadores dedicados y recicladores de materiales. Los bienes recolectados a través de canales minoristas inversos podrían enviarse directamente a fundiciones bajo arreglos de envío prepago. Las entidades de consolidación podrían recolectar bienes de los municipios, centros de reciclaje y grandes centros comerciales e institucionales. Los servicios de reciclaje podrían ser pagados por las cuotas de la industria a la entidad de reciclaje colectivo.

Los escenarios anteriores son útiles para identificar elementos de programas de recolección que probablemente funcionen para los módulos solares al final de su vida útil. En este contexto, podemos hacer tres observaciones generales:

1. Paralelamente al escenario de los dueños de grandes plantas fotovoltaicas, la recolección de módulos solares al final de su vida útil podría ser económicamente factible para grandes instalaciones centralizadas, donde los costos pueden ser absorbidos por el instalador del sistema o capitalizados por el propietario del sistema.
2. En el segundo escenario, los canales minoristas inversos y la recogida periódica por empresas de logística inversa puede ser la mejor estrategia para la recolección de módulos dispersos en pequeñas instalaciones remotas y aplicaciones residenciales y/o comerciales. Los módulos recolectados por las entidades municipales probablemente podrían ser manejadas por la industria fotovoltaica proporcionando orientación a los municipios, sin involucrarse directamente con la manipulación y el reciclaje.
3. Para el tercer escenario, esta entidad de reciclaje colectivo podría ser un participante útil en los esfuerzos de reciclaje de los módulos fotovoltaicos, ya sea que estos módulos proporcionen o no valores de recuperación de componentes y metales que normalmente apoyan otras industrias del reciclaje.

Una propuesta exitosa de modelo de recolección debería considerar los 3 aspectos antes mencionados. (Fthenakis V. M., 2000)

Un modelo de esas características funcionaría considerando las cantidades de módulos a reciclar, tomando en cuenta los dos principales mercados de módulos fotovoltaicos: sistemas fotovoltaicos para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, típicamente menores a 100 [kWp] y sistemas fotovoltaicos correspondientes a plantas de generación, como PMGD o a mayor escala.

Si tomamos como base el sistema de recolección de PV Cycle, tendríamos el siguiente esquema:

Figura 11: Esquema de recolección de módulos fotovoltaicos.²⁷



Para pequeñas cantidades, el dueño o instalador puede transportar los módulos a uno de los puntos de recolección ubicados, por ejemplo, en los locales de venta de los distribuidores, instaladores, o dependencias municipales.

Para grandes cantidades, los módulos son recolectados directamente en los puntos de ubicación de las plantas (PV Cycle, 2020).

Para establecer una estrategia de recolección de módulos fotovoltaicos, podemos adoptar, en principio, que cada productor, sea fabricante, distribuidor o dueño de una planta fotovoltaica es responsable de los módulos fotovoltaicos cuando se conviertan en residuos, y tratarlos de forma ecológica, es decir aptos para su valorización y reciclaje.

La recolección y almacenaje de los módulos fotovoltaicos antes del tratamiento de reciclaje, podría efectuarse en los siguientes puntos:

- puntos de venta a los usuarios finales;
- lugares de recolección de los operadores económicos de gestión de residuos;
- puntos municipales de recolección de residuos;
- recolección móvil por vehículos, equipados con contenedores cerrados.

La retirada de los módulos fotovoltaicos desde sistemas residenciales, industriales y comerciales, acogidos a la ley de Net Billing, se realizaría sin necesidad de pago de los usuarios finales.

Dentro de los requisitos que un plan de gestión de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil debiera plantear es una comprobación temprana de su posibilidad de reutilización. Por ello se hace importante que la recolección se haga de acuerdo con protocolos específicos de manejo para

²⁷ (PV Cycle, 2018)

evitar, en primer lugar, daños a las personas, y luego a los módulos fotovoltaicos. Además, los puntos de recolección, las instalaciones de recolección y los operadores deberán tener una asociación con distintos actores para darles acceso a los módulos reutilizables y su posterior comercialización y/o donación.

La entidad responsable de la recolección deberá proporcionar información adecuada acerca de los potenciales riesgos, como cortes, apriete de dedos o manos y posibles descargas por contacto con conductores desnudos, en el manejo de los módulos fotovoltaicos. La información debiera ser accesible y deberá indicar, además, aspectos básicos acerca de la potencialidad de reutilización de los módulos fotovoltaicos en buen estado.

4.3.2 Transporte

Con el fin de organizar los servicios disponibles y que sean de fácil acceso para los usuarios finales, los productores y distribuidores de módulos fotovoltaicos garantizarían el establecimiento de un sistema con cobertura nacional para la extracción, devolución y recolección de sistemas de pequeña escala.

La cobertura nacional del sistema de devolución y recolección de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil y que estén acogidos a la ley de Net Billing, deberá garantizar un lugar fijo por cierta cantidad de habitantes. La determinación de este número podría ser calculada considerando la cantidad actual de proyectos en funcionamiento en cada región y un volumen proyectado a futuro. Luego, utilizando una función de proximidad, pueden establecerse las locaciones óptimas para la recolección de módulos fotovoltaicos en desuso. El cumplimiento de este requisito podrá ser implementado conjuntamente por todos los colectivos registrados, proporcionalmente a su cuota de mercado (Lu, 2019).

En caso de un asentamiento con una cantidad de habitantes menor a la determinada, se proporcionaría la recolección móvil por vehículos, equipados con contenedores cerrados.

El número mínimo y los requisitos para la ubicación de los lugares para contenedores para la recolección de módulos fotovoltaicos al final de vida útil se incluirían en los planes regionales de gestión de residuos definidos de acuerdo con los criterios sobre accesibilidad, disponibilidad y densidad de población.

En el caso de retiro desde plantas fotovoltaicas a gran escala, la recolección debiera ser programada con el cliente, quien dispondrá de los módulos listos para su transporte. El desmontaje de los módulos desde sus estructuras de soporte no se considera parte de la gestión de retiro de los módulos.

En el traslado de los módulos desde los puntos de recolección o desde una planta a gran escala hacia la planta de reciclaje, se debieran considerar contenedores o pallets, que protegieran los módulos de posibles daños en la manipulación y el traslado. Un protocolo de transporte debería considerar, al menos, los siguientes puntos:

- Los módulos fotovoltaicos de capa fina y cristalinos deben ir embalados por separado.

- Los módulos fotovoltaicos sin marco y enmarcados deben ir separados.
- Los módulos deben apilarse de tal forma que el vidrio frontal (cara activa) vaya hacia abajo.
- Los módulos fotovoltaicos que se encuentren debajo de la pila no deben dañarse.
- Una pila de módulos fotovoltaicos debe asegurarse con cinta adhesiva o envolverse firmemente.
- La posibilidad de transportar los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil en contenedores abiertos, sin una cubierta impermeable, no será aceptada.

Los puntos anteriores también deben ser considerados en el caso del almacenamiento de los módulos en los puntos de recolección y en las plantas de reciclaje.

4.3.3 Almacenamiento

En la etapa de almacenamiento de los módulos, lo primero sería establecer el tiempo máximo que los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil quedaran en esta etapa. La acumulación de una gran cantidad de existencias podría aumentar el riesgo de un tratamiento de baja calidad o el deterioro de módulos que tuvieran la oportunidad de reutilización.

Es durante esta etapa en que debe hacerse un diagnóstico del potencial de reutilización que tendrá un módulo fotovoltaico, sometiéndolo a distintas pruebas eléctricas tales como electroluminiscencia, curva I-V, medición de tensión en vacío y corriente de corto circuito, para determinar su óptimo funcionamiento, posterior a una acabada inspección visual, verificando que no existe deterioro en el vidrio frontal, marcos de aluminio y caja y cables de conexión. Este diagnóstico podría efectuarse en los puntos de recolección o en la misma planta de tratamiento y de ahí derivar los módulos de reutilización al mercado secundario.

Durante el almacenamiento, los módulos para el reciclaje y para reutilización deben permanecer cubiertos con el fin de que no sean afectados por las condiciones climáticas, poniendo en peligro la implementación de los requisitos de tratamiento o reutilización.

Es importante que durante el transporte y almacenamiento se tengan en cuenta aspectos de seguridad al manipular los módulos fotovoltaicos en desuso, ateniéndose a lo dispuesto en la Ley N°16.744 que establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Debido a que la incidencia de la luz sobre los módulos produce una tensión eléctrica, se deben establecer requisitos de seguridad en su manipulación. No obstante, las tensiones de circuito abierto, en general, se encuentran por debajo de los 50V, en caso de una conexión eléctrica no deseada entre los terminales positivo y negativo con una exposición total al sol, se podría crear un arco eléctrico, aumentando los riesgos de electrocución o incendios. Se debe tener especial cuidado al manipular módulos fotovoltaicos con contactos desnudos (Bundesverband Solarwirtschaft BSW, 2019).

Por lo anterior, es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones en la manipulación de los módulos:

- No se debe quitar el marco de aluminio.
- Los cables del módulo deben fijarse a la parte posterior del panel con cinta adhesiva.
- Se deben quitar todas las fijaciones mecánicas, como abrazaderas, subestructuras y rieles.
- Los bordes de aquellos módulos que no tengan el marco de aluminio deberán ser protegidos con cartón u otro material.
- Se deben utilizar separadores de cartón entre módulos almacenados sin marco, cuidando que esa capa intermedia sea del mismo grosor que la caja de conexiones del módulo.
- Los módulos fotovoltaicos con vidrios rotos deben cubrirse y estabilizarse con cinta y cartón.
- Si los cables de conexiones están dañados o expuestos, deben aislarse con cinta eléctrica aislante.
- Si el módulo presenta daños en la lámina EVA o tiene la caja de conexión dañada, deben ser cubiertas con cinta aislante.
- En el caso de módulos fotovoltaicos bifaciales, el lado activo debe ser cubierto, especialmente si la caja de conexiones presenta los terminales desnudos.

4.4 Propuesta para el tratamiento de los residuos de módulos FV para Chile

En el capítulo 4.2. se han elaborado los escenarios que proyectan el fin de vida útil según los factores levantados en el estudio y a partir de las entrevistas con expertos en el rubro. Para cada uno de estos escenarios se ha proyectado la cantidad de módulos FV que se van a generar como residuos en Chile hasta el año 2050.

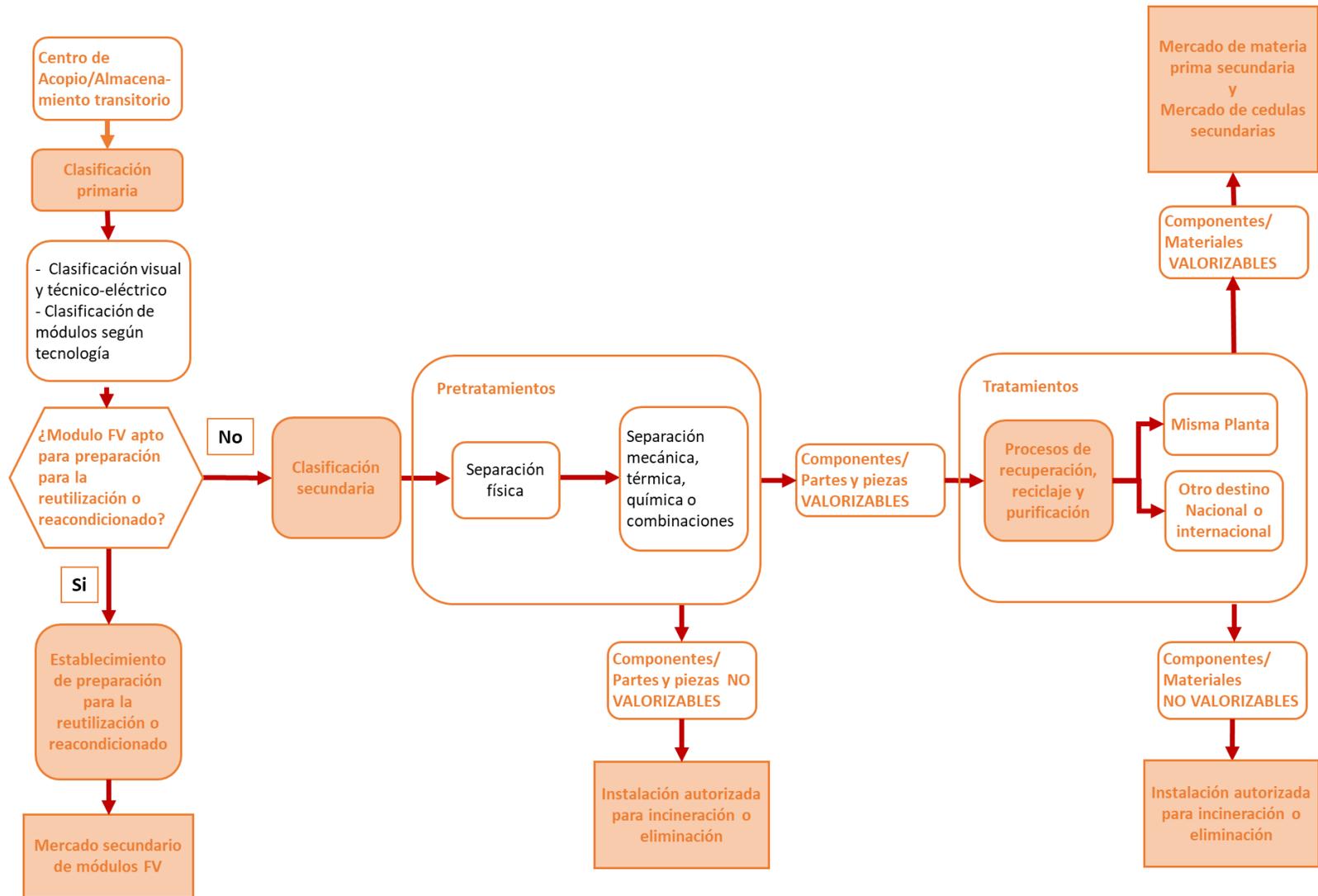
En base de estos escenarios se ha desarrollado una propuesta para el tratamiento de residuos de módulos FV a partir del momento de su acumulación en centros de acopios o almacenamiento temporal en lugares autorizados.

El desarrollo de una propuesta de tratamientos de módulos de FV para Chile se base en la revisión de varios factores claves:

- a. Revisión de los tratamientos desarrollados internacionalmente para el reciclaje y recuperación de componentes de los módulos FV (Informe 2, capítulo 3.1.4)
- b. Levantamiento de los tratamientos existentes en Chile (Informe 3, capítulo 4.1)
- c. Análisis de los volúmenes generados de residuos en detalle de módulos FV proyectados de acuerdo al escenario Caso 1 (Informe 3, capítulo 4.2)
- d. Estimación de la necesidad del desarrollo de infraestructura faltante para lograr el tratamiento adecuado y eficiente de los residuos de módulos FV pronosticados en los escenarios.

En el siguiente diagrama de flujos se presentan las soluciones y vías posibles de los residuos de módulos FV de acuerdo a lo indicado en el capítulo 4.1.

Figura 12: Flujograma de clasificación, pretratamiento y tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos



Como se ha mencionado en el Informe 1 capítulo 4.4.1, la Ley 20.920 establece la jerarquía en el manejo de residuos con las definiciones mencionados en el mismo capítulo:

4.4.1 Prevención²⁸

Según la definición en la Ley 20.920, la prevención es un conjunto de medidas adoptadas en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o producto, para reducir la cantidad de residuos. Respecto a los módulos FV, producto que no se fabrican en Chile y entran a través de importación al país, los avances del ecodiseño y prevención de residuos apunta más al mercado global de módulos FV.

Una de las condicionantes de una buena prevención en la generación de residuos es la colaboración de los fabricantes para la reutilización de algunos componentes en la remanufactura. El diseño inicial puede facilitar el reciclaje y maximizar los beneficios económicos y ambientales en el futuro.

El ecodiseño puede facilitar el reciclaje futuro a escala comercial. La responsabilidad financiera en virtud de los esquemas REP también actúa como un incentivo para que los fabricantes diseñen para el reciclaje. El ecodiseño de módulos debería considerar el desmontaje que consuma menos energía, la reutilización y el reciclaje de materiales más eficientes y el reemplazo de componentes tóxicos. Sin embargo, el concepto de “diseño para el desmontaje” en la fabricación de productos electrónicos es más desafiante para los módulos fotovoltaicos²⁹. Esto se debe a que se espera que funcionen al aire libre durante 25 a 30 años, por lo que requieren resistencia a factores ambientales como el viento, la luz ultravioleta, los ciclos de calor y la humedad.

Otro elemento que es común para incentivar el ecodiseño son las exigencias mediante certificaciones. Sin embargo, como se menciona en el Informe 2 capítulo 3.4, no existe una certificación respecto a la reciclabilidad de los módulos en el mundo. La aplicación de medidas de prevención está dirigida principalmente a la fase antes del fin de vida útil y tienen que ver más con mejoras en la eficiencia energética de los módulos FV.

4.4.2 Preparación para la reutilización y reutilización³⁰

Este nivel de la jerarquía está definido como una acción de revisión, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos desechados se acondicionan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa. Junto con el nivel de la reutilización, acción mediante la cual productos o componentes de productos desechados se utilizan de nuevo, sin involucrar un proceso productivo. En el caso de los módulos FV, se aplican antes del fin de vida útil. Este nivel es más bien una transformación del producto durante la vida útil, una alternativa intermedia donde el producto se transfiere de un proyecto a otro y se alarga la vida útil en general.

²⁸ Definiciones según: Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Ley N°20.920

²⁹ Deng, Rong & Chang, Nathan & Ouyang, Zi & Chong, C.. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 109. 532-550.

³⁰ Definiciones según: Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Ley N°20.920

El valor del material recuperado de los módulos reciclados se rige por cómo se utiliza. El valor se optimiza cuando algunos componentes desmontados se pueden reutilizar en la industria original como insumos de alto valor de la cadena de suministro, es decir, la remanufactura. En este sentido el mayor desafío técnico para los fabricantes es garantizar que el rendimiento de los módulos remanufacturados sea competitivo con otros en el mercado en cuanto a eficiencia y durabilidad.

Por otra parte, debido al rápido desarrollo de la tecnología puede darse el caso del reemplazo de módulos funcionales por otros más eficientes lo que podría ocasionar la disponibilidad de una gran cantidad para su reutilización en otros usos.

El escenario de fin de vida útil Caso 2, como se ha mencionado en el capítulo 4.2.4.2 de este Informe, contiene la posibilidad de reutilización en un mercado secundario, tal como se describe en el Informe 1 capítulo 4.4.3. En la práctica, esto implica que las cantidades de módulos descartados por renovación de tecnología u otras razones de desmantelamiento, no se van a reciclar ni disposición en relleno de seguridad, siguiendo su vida útil en otros proyectos o aplicaciones. Esto no altera su vida útil de 30 años como ha supuesto el Escenario Caso 1. Dado a que a nivel internacional no se ha llegado a este punto de un desmantelamiento temprano de forma masiva, no hay datos de experiencia para evaluar qué porcentajes van a mercados de reutilización y cuales a un reciclaje.

En Alemania, recién en el año 2020 están terminando sus contratos de 20 años los primeros grandes proyectos FV y no se ha producido un reemplazo o desmantelamiento a gran escala hasta hoy³¹. Sin embargo, se han desarrollado mercados secundarios como Second Sol³² y MilktheSun donde se comercializan módulos FV, componentes de módulos FV o plantas completas, junto a otras tecnologías renovables. En el mismo rubro de la reutilización de módulos FV, se lanzó recientemente la empresa Suncrafter³³, la que se enfoca en proyectos off grid, instalando módulos FV reutilizados en proyectos urbanos y rurales en el mundo.

En Europa existe una iniciativa llamada Circusol³⁴. Este proyecto de acción en innovación es financiado por el programa Horizon 2020 de la Comisión Europea, el que investiga nuevas soluciones de negocios en el marco de la economía circular en el sector FV.

El gran desafío de la reutilización durante la vida útil es contar con infraestructura de medición y análisis de calidad y seguridad en módulos en desuso o de cambio de uso³⁵. La preparación para la reutilización debe comenzar con un mejor comisionamiento técnico in situ, para evitar que los paneles que presenten fallas o tengan una menor eficiencia se deban eliminar o reciclar en el país de fabricación.

³¹ Según el experto Mirco Sieg de PV Magazine

³² www.secondsol.de o www.milkthesun.de

³³ <https://suncrafter.org/en/>

³⁴ <https://www.circusol.eu/en>

³⁵ Según Eszter Voroshazi, gerente de D&I liderando la investigación de soluciones para módulos FV de segunda mano en Imec³⁵, I&D hub para tecnologías nano y digitales en https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/older-modules-for-reuse-not-refuse/?utm_source=Biblio&utm_campaign=Internal

En Chile la empresa Solarix³⁶, liderada por Danilo Ferri, ofrece en la actualidad el servicio de medición de rendimiento en el lugar de la instalación y la desinstalación y disposición final de módulos FV al final de vida útil. En la entrevista³⁷ realizada, se incluye dentro del modelo de negocio la venta de módulos de segunda mano en bajas cantidades. Sin ahondar en la metodologías de tratamiento ni definición de plazos, están abordando el desafío de desarrollar la infraestructura para el tratamiento de módulos FV, incluyendo la preparación para la reutilización y reciclaje de residuos de módulos FV.

4.4.3 Reciclaje

El reciclaje está definido como el empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo. En el informe 2, capítulo 3.1.4. se describió en detalle los tratamientos de reciclaje que se han desarrollado para los módulos fotovoltaicos al fin de su vida útil en el mundo. En el actual informe, el capítulo 4.1. recopila estos tratamientos existentes y analiza, desde la óptica nacional si existe factibilidad de soluciones que se puedan implementar en este momento en Chile, de acuerdo con el mercado de reciclaje actual.

A partir de esto se puede resumir que, en la actualidad, teóricamente, existe infraestructura para los siguientes pasos del reciclaje, tratando los componentes mencionados de módulos fotovoltaicos en Chile:

1. Plantas para la separación y clasificación de componentes. Los productos resultantes de estas plantas son:
 - Aluminio y acero de los marcos y/construcciones
 - Cobre, proveniente de componentes eléctricos y electrónicos como cajas de inversores y cables
 - Vidrio en conjunto con los encapsulados y lamina posterior: láminas de polímeros y células
2. Plantas de reciclaje de aluminio u opciones para su exportación
3. Plantas de reciclaje de Vidrio (solo se puede procesar vidrio no contaminado y de calidad menor)
4. Plantas de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos (reciclaje de algunos componentes solamente)

Con la infraestructura existente se podría absorber el 80% de los componentes de un módulo FV en peso: el marco de aluminio, el vidrio y las partes de cobre del cableado y caja de conexiones.

Para los siguientes componentes todavía no existen tratamientos específicos por falta de infraestructura en Chile, lo que significa que aún no se pueden valorizar:

5. Elementos de la separación del vidrio de los encapsulados y otras láminas
6. Componentes de plásticos EVA (polímeros)

³⁶ <http://www.solarix.cl/>

³⁷ Minuta en el anexo

7. Componentes de los encapsulados (estructuras laminadas, células de Si y/u otros metales)

En la actualidad, estos componentes deben ser eliminados cumpliendo la normativa vigente en rellenos de seguridad.

Si llegase a ser económicamente factible, existe la posibilidad de exportar componentes que no tienen mercado en el país ni tratamientos nacionales, bajo las condiciones de las normativas vigentes sobre exportación de residuos o de materia prima secundaria.

Como se explica en el Capítulo 4.1 del presente informe, existen tratamientos que pudieran ser adaptados para el reciclaje de módulos FV. La infraestructura nacional existente hoy es limitada, también existen tecnologías que hoy se aplican a otros componentes o industrias y que pueden ser adaptadas para lograr los tratamientos de los módulos FV.

En las siguientes tablas se presenta un resumen de los tratamientos posibles y su existencia o no existencia en Chile:

Tabla 10. Tipos de tratamientos y procesos de reciclaje existentes en Chile

Tipo de Tratamiento	Proceso	Presente en Chile
<i>Separación de componentes</i>	Separación Mecánica	SI
	Lixiviación	NO
<i>Delaminación</i>	Desintegración Física (Trituración)	SI
	Disolución Orgánica	NO
	Disolución por Ácido Nítrico	NO
	Combustión	NO
	Irradiación ultrasónica	NO
<i>Purificación</i>	Hidrometalurgia	SI
	Pirometalurgia	SI

Tabla 11. Tipos de componentes de residuos FV valorizables con la tecnología existente o potencialmente adaptada

Componente	Valorización en Chile³⁸
Vidrio	SI
Polímeros (EVA, Tedlar)	NO
Aluminio (Al)	SI
Silicio (Si)	NO
Cobre (Cu)	SI
Plata (Ag)	SI*
Boro (B)	NO
Fósforo (P)	NO
Estaño (Te)	SI*
Plomo (Pb)	SI*
Cadmio (Cd)	SI*
Telurio (Te)	SI*

4.4.4 Una planta hipotética especializada para el reciclaje de módulos fotovoltaicos

Si bien la idea de que un producto cualquiera puede ser valorizado casi en su totalidad en una planta especializada, la realidad del reciclaje es más compleja, principalmente debido a criterios de costo-eficiencia de los procesos de reciclaje.

No obstante lo anterior, una planta hipotética para el tratamiento de módulos fotovoltaicos completa, que cuente con la infraestructura para la recuperación del máximo de materiales posibles y llegando a la forma y pureza para la venta de los materiales para la fabricación de nuevos productos tendrá las siguientes etapas:

1. Clasificación primaria: Línea de clasificación preliminar:
 - Clasificación visual y técnico-eléctrico (rendimiento) de módulos apto para el mercado secundario (preparación para la reutilización o reutilización)
 - Clasificación de módulos según tecnología

2. Clasificación secundaria:
 - Línea de clasificación de componentes de módulos de fácil separación
 - Componentes eléctricos (cables y caja de conexión), marcos de aluminio, vidrio con láminas encapsuladas (celdas laminadas más material de encapsulamiento y lámina posterior).
 - Línea de separación del vidrio de los encapsulados (separado por tecnología policristalina o capa fina): tratamientos mecánicos, térmicos, químicos, ópticos, o mezclas de estos

A partir de este punto los materiales van a diferentes líneas para un tratamiento que lograr recuperar el material de forma o pureza apta para su venta a otros procesos de producción.

³⁸ un SI* refiere a una tecnología adaptable en un futuro para valorización de módulos FV

3. Línea de reciclaje de vidrio (fundición)
4. Línea de reciclaje de celdas/metales dependiendo de la línea de separación: tratamientos de limpieza, trituración, procesos químicos como la hidrometalúrgica
5. Línea de reciclaje de equipos eléctricos y electrónicos (separación y reciclaje de cada material)
6. Línea de reciclaje de Aluminio (fundación)

4.4.5 Pronostico del momento cuando se justifica la creación de infraestructura

El pronóstico del momento en que se justifica la creación de la infraestructura especializada para el reciclaje de los residuos de módulos fotovoltaicos es complejo, en parte por todos los factores anteriores y debido a la influencia del mercado de los materiales y los cambios en el marco regulatorio, como la promulgación del Decreto Supremo sobre el producto prioritario AEE.

La creación de nueva infraestructura de reciclaje puede darse de dos formas: al momento en que cuando la infraestructura existente no alcanza a absorber los volúmenes del residuo que se generan. O cuando no se dispone de la infraestructura existente o la tecnología para aprovechar del beneficio socioeconómico que se puede dar por un tratamiento adecuado. En el siguiente apartado se ha tratado de identificar este momento, revisando cual son los factores que influyen en estas dos formas.

Hay dos factores o estímulos importantes que se han considerado para la justificación de la creación de infraestructura adicional para el tratamiento de módulos FV:

1. La obligación de cumplir metas de reciclaje bajo los esquemas REP.
2. El beneficio económico que se pueda obtener de los procesos de reciclaje como negocio.

El momento definido por el régimen REP:

La oportunidad para desarrollar la infraestructura necesaria para reciclar módulos FV o para incrementar su potencial de valorización va a depender de variados factores principalmente de mercado y del marco regulatorio.

Por lo general, el desarrollo de la capacidad de reciclaje emerge si el valor de los materiales excede el costo del reciclaje. En ocasiones, los incentivos de mercado no son suficientes por lo que se requiere de un estímulo regulatorio como por ejemplo las obligaciones que derivan de la Ley 20.920, para cubrir las brechas de mercado.

Este primer factor tiene una importancia en la creación de infraestructura de reciclaje dado a que se incentiva la inversión en infraestructura por la obligación financiera de los productores. Los recicladores no sólo van a asegurar un volumen mayor de material producto de estas obligaciones, sino que también parte de los costos de financiamiento de los productores incluye por lo general pagos a los recicladores para asegurar el cumplimiento de la Ley. Esto se intensifica conforme aumentan las metas y se requiere superar la capacidad de infraestructura existente para el cumplimiento de estas.

De acuerdo a la Ley 20.920, los productores son responsables de organizar y financiar los sistemas de gestión que aseguren la valorización de los módulos FV (como parte del producto prioritario AEE) en base a los volúmenes que introducen en el mercado.

En el siguiente apartado se realiza un contrapunto respecto a las metas de la U.E. y la realidad de la infraestructura existente en Chile.

Las metas de valorización y reciclaje actuales de RAEE en la UE, como se ha descrito en el benchmarking del Informe 2 capítulo 4.2.1, son las siguientes:

Tabla 12: Tratamiento de Módulos Fotovoltaicos bajo la Directiva de la Unión Europea 2012/19/UE

	META DE RECOLECCIÓN ANUAL	META DE VALORIZACIÓN/RECICLAJE ANUAL³⁹
DIRECTIVA RAEE (2012/19/EU) DESDE 2018	65% (peso) de todo AEE puesto en el mercado o 85% de residuos generados	85% valorización, 80% preparado para reutilización y reciclaje

La Directiva europea es facultativa en cuanto al cumplimiento de las obligaciones para los módulos FV, plantea como alternativas para los productores la recolección del 65 % de los módulos puestos en el mercado o el 85% de los residuos generados de módulos FV al momento de generarse. La meta alternativa aplicable en los residuos generados es la forma como la UE ha decidido incorporar el problema de la duración de los módulos FV en el tiempo.

En el caso de que los productores decidan optar por la primera alternativa, el reciclaje o reutilización real que deberán cumplir será de 52% (80% de 65%) de lo puesto en el mercado y en el segundo caso sería un volumen equivalente al 68% de lo generado como residuo FV (80% de 85%).

Como se menciona en el capítulo 4.4.1.1, hoy en día en Chile, en un escenario de LVR solo se puede reciclar el aluminio, el vidrio de calidad menor y partes de cobre. Con esta infraestructura de tratamientos de residuos de FV se logra a un reciclaje teórico de aprox. 77,5% del peso de un módulo con la infraestructura existente hoy en Chile.

Para los porcentajes de reciclabilidad de materiales (post tratamiento) se asumen los siguientes índices de reciclabilidad para un reciclaje con la infraestructura existente en Chile:

³⁹ La recuperación debe entenderse como la operación física que conduce a la reclamación de un flujo o fracción de material específica del flujo general. El reciclaje, por otro lado, debe entenderse en el contexto de la preparación de ese flujo recuperado para su tratamiento y reutilización. (IRENA, 2016)

Tabla 13. Porcentaje de reciclabilidad por tipo de material:

Materiales de módulos FV (1 módulo)	Cristalino unifacial (kg)	% Reciclaje en Chile	Masa reciclada (kg)
Vidrio	15.50	85%	13.18
Polímeros (EVA, Tedlar)	1.60	0%	0.00
Aluminio (Al)	2.20	100%	2.20
Silicio (Si)	0.45	0%	0.00
Cobre (Cu)	0.13	59%	0.08
Plata (Ag)	0.00	0%	0.00
Boro (B)	0.02	0%	0.00
Fósforo (P)	0.02	0%	0.00
Estaño (Te)	0.02	0%	0.00
Plomo (Pb)	0.02	0%	0.00
Cadmio (Cd)	0.00	0%	0.00
Telurio (Te)	0.00	0%	0.00
Total Residuos (kg)	20.0		15.5
Total Residuos (%)		100%	77.5%

La tasa de reciclaje de los módulos FV que se logra en el momento en Europa de acuerdo a PV Cycle (Informe 2, capítulo 3.1.4) es del 88% del peso de un módulo FV.

A partir de lo anterior se podría señalar que incluso en un escenario de metas europeas no habría impedimentos para cumplir con las obligaciones de reciclaje. Sin embargo, estas dependen en gran medida de que la fracción de vidrio, que da cuenta más del 80% del peso de un módulo sean absorbidas por la industria del vidrio. Ese claramente es uno de los mayores desafíos por delante.

Tampoco se puede soslayar el hecho de la deficiente capacidad de reciclaje de RAEE existente en Chile en la actualidad. Según los resultados de diagnóstico “Desafíos para la implementación de la Ley 20.920 para el sector de Aparatos Eléctricos y Electrónicos” (Regenerativa, 2018), la capacidad instalada país para la valorización de RAEE se estima entre 2%-7% de la generación total de RAEE en Chile para el año 2018, ósea, de la estimación de 160,000 ton de RAEE para el año 2016⁴⁰, por lo que solo un máximo de 11,200 ton de RAEE podrían ser valorizados en Chile al día de hoy. Cabe señalar que esa cifra no considera los residuos FV, los que tampoco se producirán masivamente, como se ha señalado en el estudio, hasta entrada la década de 2040.

Bajo el régimen de la Ley 20.920 se deberá la creación de infraestructura más especializada, por ejemplo, infraestructura para la revisión de módulos y para la preparación para la reutilización e incluir esto en los negocios al fin de vida útil de los módulos FV. Además, se necesitará de infraestructura más especializada para el reciclaje como una línea de separación del vidrio que logre separar las láminas encapsuladas con tratamiento térmico y químico adicional al mecánico y con esto, llegar a tasas mayores de recuperación del vidrio de alta pureza.

⁴⁰ E-Waste Monitor 2017 (Regenerativa, 2018)

Para llegar a una meta de más que 65% del peso de un módulo reciclado, falta la creación de infraestructura más especializada, por ejemplo, una línea de separación del vidrio que logre separar las láminas encapsuladas con tratamiento térmico, químico adicional al mecánico y con esto, llegar a más altas tasas de recuperación del vidrio con alta pureza.

A partir de lo anterior, se debe que analizar el impacto que pueden causar las metas y obligaciones en la infraestructura de reciclaje y estudiar en detalle la factibilidad de metas considerando el desarrollo de tecnología de reciclaje, los porcentajes alcanzables y las inversiones en infraestructura adicional, considerando los plazos que requiere esto. No obstante, lo anterior, y como se ha dicho, si se toma en cuenta las proyecciones de residuos de módulos FV para el año 2042, es posible que, en el intertanto, la capacidad de reciclaje de otros RAEE se desarrolle mucho más, preparando de paso, la tecnología y capacidad de reciclaje que requieren los módulos FV.

En el caso de los residuos que no se pueden reciclar, como la fracción plástica de los conductores y la mezcla de silicio adheridas a metal, plástico y vidrio que en el caso de un reciclaje simple la trituradora no puede separar más, terminan por lo general en un relleno de seguridad o se incineran en el caso de que esa alternativa exista. El mismo destino tiene la fracción de residuos de los tratamientos térmicos en forma cenizas y/o de los químicos en la forma de precipitado seco, líquido, o lodo.

El momento definido por la posibilidad de generar beneficio socioeconómico:

Según un estudio de la comisión Europea del año 2011 (European Comission DG ENV, 2011), existe una gran diferencia de beneficios socioeconómicos para el país bajo dos escenarios de reciclaje (ER), definidos por la tecnología implementada, y en base de los volúmenes generados, recuperados y tratados bajo diferentes escenarios de legislación REP.

Como se ha mencionado en el primer Informe de este estudio en el capítulo 4.4.4, los procesos de reciclaje cuales se han desarrollado para la recuperación de los materiales se pueden dividir en dos escenarios de reciclaje (ER) que dependen de distintos grados de desarrollo de la industria en cuanto al reciclaje de los distintos materiales: el High Value Recycling (HVR) y Low Value Recycling (LVR)

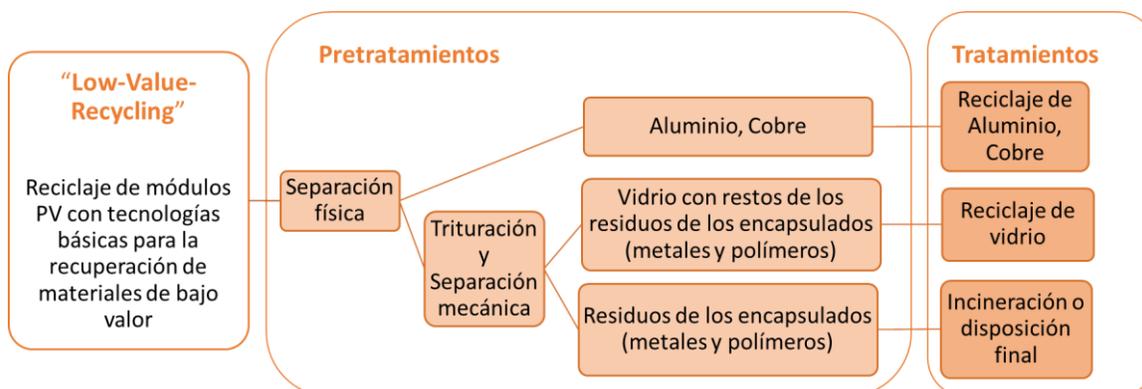
En base de esto se ha desarrollado dos escenarios para Chile cuales pueden ser comparados en cuanto a sus costos y beneficios, considerando que el primer escenario de reciclaje (LVR) se base en la infraestructura existente en Chile y el segundo escenarios de reciclaje (HVR) corresponde a un escenario con creación de nueva infraestructura o adaptación de otras aplicaciones.

Para esto se ha considerado solo el Caso 1 de los escenarios de generación de residuos, dado a que es el caso con mayor posibilidad de verse realizado en el momento según la experiencia internacional. Además, cuando se incluye la reutilización de módulos FV igualmente se proyecta un fin de vida útil de 30 años, cual resulta en ser coherente con el escenario Caso 1.

En el siguiente se presentan los datos en cual se base cada uno de los escenarios LVR y HVR:

LVR: Low- Value Recycling (reciclaje de tecnologías simples):

Figura 13: Low-Value-Recycling en módulos fotovoltaicos⁴¹



Este escenario cuenta con la recuperación de los materiales de mayor volumen y peso, más fáciles de separar como el aluminio, los conductores eléctricos y electrónicos y el vidrio, dejando materiales de menor volumen, de difícil y costosa separación o reciclaje como descarte no aprovechable. Los procesos utilizados son mayormente físicos o mecánicos.

En este escenario se asuma los siguientes precios para el reciclaje:

Tabla 14: Precios de reciclaje LVR

Material recuperado:	Costo de transporte:	Costo de reciclaje LVR (UF/ton)
Aluminio	N/A	0,81
Vidrio menor calidad		
Cobre		

Asimismo, y basado en las tasas de reciclaje mencionados en el capítulo anterior, se calcula con los siguientes porcentajes de reciclaje y precios de mercado de materia prima secundaria:

Tabla 15: Tasas de reciclaje LVR

Material recuperado:	Tasa de reciclaje:	Precio: (UF/ton)
Aluminio	100%	22,68
Vidrio menor calidad	85%	1,72
Polímeros (EVA, Tedlar)	0%	0
Cobre (Cu)	58,8%	111,65
Otros	0%	0

⁴¹ Fuente: Adaptado de (European Commission DG ENV, 2011)

materiales no recuperables		
-----------------------------------	--	--

HVR: High Value Recycling (reciclaje de alto valor con tecnología avanzada):

Figura 14: High-Value-Recycling⁴²



Este escenario cuenta con la recuperación de la mayoría de los materiales usados en los módulos FV, incluyendo los componentes que se encuentran en proporciones menores, que necesitan una industria de reciclaje de procesos de alta tecnología, utilizando no solo procesos mecánicos, sino también térmicos, químicos o combinaciones de estos para la recuperación de materiales, algunos de los cuales tienen un alto valor económico en el mercado.

En este escenario se asumen los siguientes precios para el reciclaje:

Tabla 16: Precios de reciclaje HVR

Material recuperado	Costo de transporte	Costo de reciclaje de alta tecnología (UF/ton)
Aluminio	N/A	4.56 ⁴³
Vidrio alta pureza		
Cobre y otros elementos valiosos		

Asimismo, y basado en las tasas de reciclaje de mencionados por en el capítulo anterior, se calcula con los siguientes porcentajes de reciclaje y precios de mercado de materia prima secundaria:

⁴² Fuente: Adaptado de (European Commission DG ENV, 2011)

⁴³ Valor promedio de tecnología de silicio y capa fina en el año 2011 según (European Commission DG ENV, 2011)

Tabla 17: Resumen de tasa de reciclaje y precio por material.

Material recuperado:	Tasa de reciclaje:	Precio: (UF/Ton)
Aluminio	100%	22.68
Vidrio menor calidad	97%	1.72
Polímeros (EVA, Tedlar)	0%	0
Cobre (Cu)	78%	111.65
Silicio (Si)	85%	50.28
Plata (Ag)	78%	14,174.98
Boro (B)	0%	0.00
Fósforo (P)	0%	5.56
Estaño (Te)	80%	495.99
Plomo (Pb)	78%	57.57
Cadmio (Cd)	98%	39.91
Telurio (Te)	80%	2419.75
Restantes no recuperables	0%	0

Suposiciones base para la comparación de los dos escenarios LVR y HVR para Chile:

Para hacer una prognosis de los costos y beneficios que tienen los dos escenarios de reciclaje y entender el punto de inflexión que justifique la implementación de niveles más avanzados de reciclaje se hacen las siguientes suposiciones:

- No se consideran los costos de la logística en el análisis debido al desconocimiento de las distancias a los futuros puntos de reciclaje y debido a que en su mayoría (componentes más pesados) serían los mismos para ambos casos.
- Dado que no se puede estimar en valores, no se incluyen costos de I&D&I, ni costos para actividades que incrementen las tasas de recolección de módulos FV al fin de su vida útil.
- Se aplicó la tasa equivalente de la meta de recolección de la directiva: Directiva RAEE (2012/19/EU): 85% a ambos escenarios.
- Para la composición y peso de los materiales se usaron los porcentajes de reciclaje investigados durante el estudio y mencionados en los informes anteriores (Sica, Malandrino, Supino, Testa, & Lucchetti, 2018).
- Se utilizaron precios de materiales del mercado actual de acuerdo al Informe 2 capítulo 3.2
- Los costos del reciclaje se estimaron a base del estudio de la Comisión Europea (European Commission DG ENV, 2011) debido a la falta de costos nacionales.
- A diferencia de los materiales considerados en el LVR del estudio de la Comisión Europea, en Chile se suma el reciclaje del cobre en el LVR ya a que este tiene una infraestructura de reciclaje y valorización desarrollada en el país.
- El costo de reciclaje y precio de venta de está calculado por precios de los materiales separados, mientras que los valores pueden ser mucho más alto cuando se recupera la unidad funcional (oblea o cedula), escenario que no fue profundizado en este estudio dado a que no se han desarrollado tratamientos para esta tecnología a escala industrial.
- Los materiales que no están valorizados se deben disponer de forma adecuada en un relleno de seguridad debido a la imposibilidad de separación de los materiales

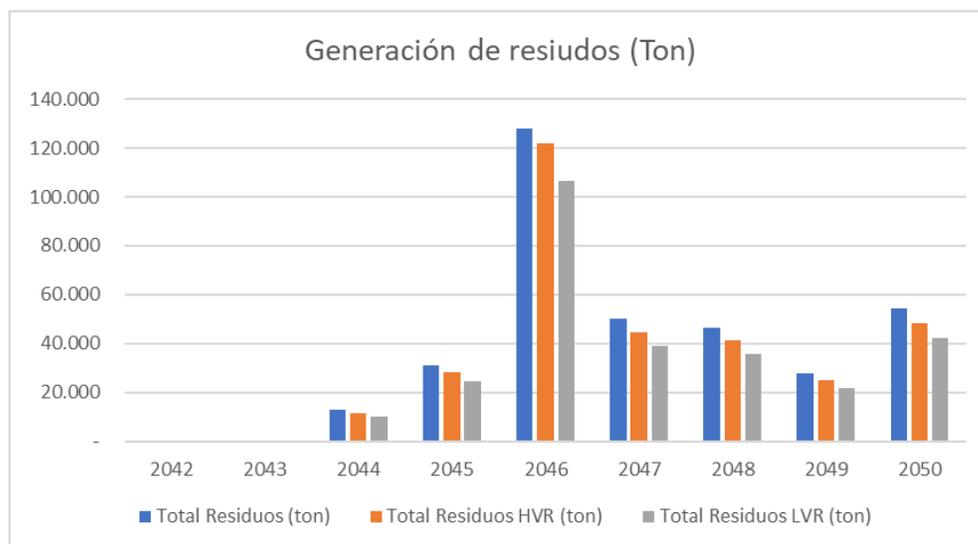
considerando sustancias peligrosas de los inocuos como el vidrio. Este costo se aplica a todos los porcentajes de no valorización para ambos escenarios.

- La comparación no incluye inversiones en infraestructura adicional a la tecnología de reciclaje, dado que esto corresponde a inversiones privadas que se justifican en estudios de factibilidad que incluyen factores adicionales.

Comparación de los dos Escenarios LVR y HVR para Chile:

En un primer esquema se muestran los volúmenes de residuos de módulos FV que entran a tratamiento por reciclaje:

Figura 15: Comparación de la generación de residuos en el caso de HVR y LVR.⁴⁴

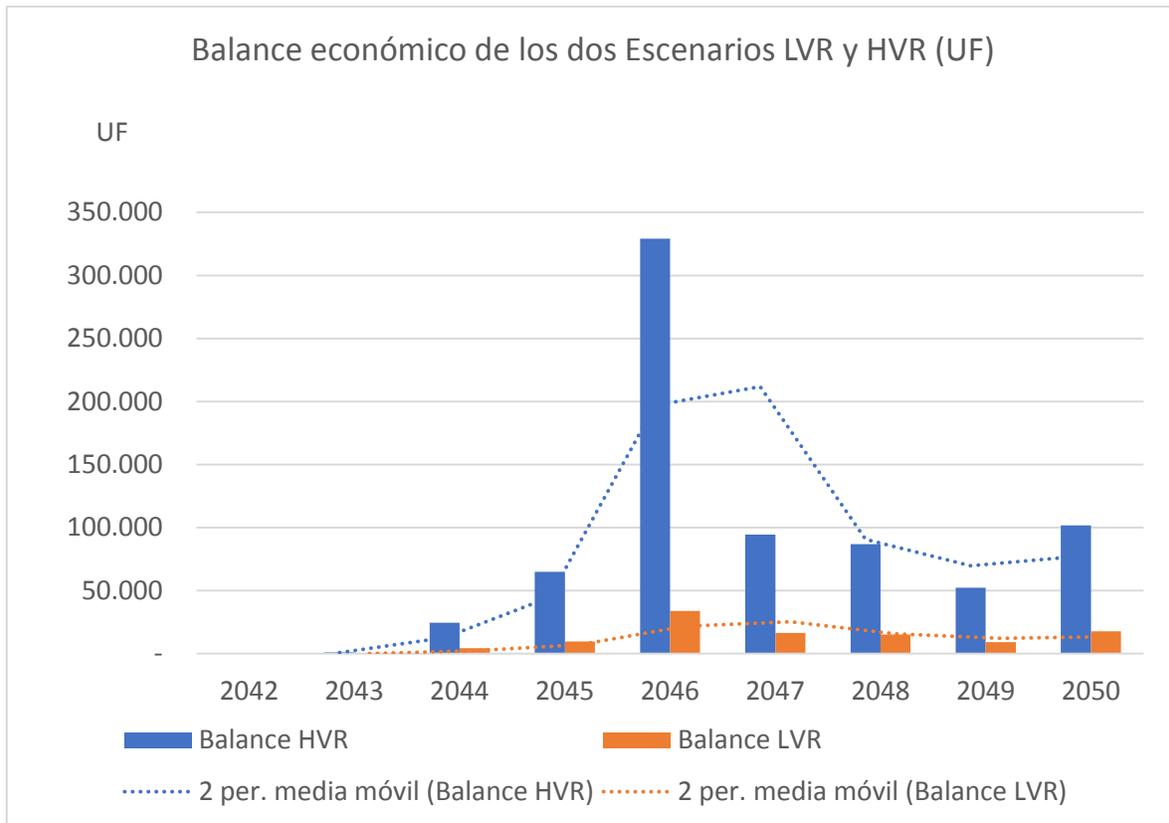


Se debe destacar que los volúmenes totales de los dos escenarios no son muy diferentes, debido a que los materiales que más peso y volumen representan en los módulos FV, van al tratamiento de reciclaje en ambos escenarios.

Donde se desarrolla la gran diferencia de los dos escenarios es en el balance económico de los dos escenarios: La comparación de los dos escenarios logra delinear los beneficios económicos que se pueden obtener en cada una de las opciones. En la siguiente figura se muestra el balance anual de cada escenario:

⁴⁴ Fuente: Elaboración propia.

Figura 16: Balance económico por escenario de reciclaje de residuos de módulos FV en Chile, Fuente: Elaboración propia



Como muestra la figura, el escenario de HVR obtiene un beneficio mayor que el escenario de LVR.

Debido a que la capacidad instalada de reciclaje se planifica a largo plazo, los ingresos anuales son hipotéticos, y el reciclaje de los módulos se realizará desfasado varios años, en un tiempo en que el mercado del reciclaje y de los materiales resultantes pueden ser muy distintos.

El escenario LVR suma un beneficio total de 106,351 UF al año 2050. Pensando en las obligaciones REP, esto significa un beneficio que bajaría los costos de licencia de un sistema de gestión.

El escenario HVR obtiene un beneficio de 754,780UF al año 2050, esto si se instala la infraestructura adecuada desde el año 2042.

En la siguiente tabla se muestran los beneficios en UF de cada tipo de reciclaje desde el año 2042 hasta el año 2050.

Tabla 18: Comparación de beneficios anuales de los escenarios⁴⁵

Tipo de Reciclaje	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	Total
Balance HVR	360	916	24,470	64,802	329,057	94,295	86,780	52,308	101,791	754,780
Balance LVR	63	159	4,257	9,651	33,917	16,403	15,096	9,099	17,707	106,351

Alineado con la generación de residuos, los beneficios suben significativamente desde el año 2044. Sin tener en cuenta la factibilidad de la instalación de infraestructura para el HVR, este año se produce un incremento importante de los ingresos resultante del reciclaje de residuos de módulos FV, por lo que se puede considerar como un momento adecuado para un quiebre tecnológico que justifique la creación (y puesta en marcha) de infraestructura que permita un reciclaje de HVR.

Finalmente, se puede mencionar que estos cálculos se basan en costos y valores actuales. Considerando que las tecnologías y eficiencias de los tratamientos se mejoran hasta el año 2042, seguramente serán mucho mejores y menos costosos para los años de análisis.

Beneficios socioeconómicos de los escenarios:

Además de los beneficios monetarios del reciclaje HVR, se tiene que mencionar el impacto socioeconómico que genera la creación de una infraestructura de reciclaje:

Para la estimación de creación de trabajo se han extrapolado las estimaciones consideradas en el estudio de la comisión europea (European Commission DG ENV, 2011).

En el escenario LVR se considera que el crecimiento del rubro de reciclaje consiste en el aumento de servicios y volumen de recolección, transporte, separación y tratamiento en plantas existentes o creación de plantas del mismo rubro en otras partes del país.

En el escenario HVR se considera la creación de nueva infraestructura, lo que significa nuevas industrias y puestos de trabajo de varios niveles en el país.

Dado a que no hay datos de experiencia sólida ni en Europa ni en Chile sobre la creación de trabajo, se ha extrapolado el número de trabajos relacionado a la generación de residuos total de los módulos FV al año 2050 en Europa para el escenario de HVR, de 20,000 trabajos nuevos en todos los niveles organizacionales.

En Europa se proyecta aprox. 1 millón de residuos de módulos FV al año 2050, mientras que en Chile se proyecta un tercio de este volumen y con esto aproximadamente se puede generar un rango de 6,700 nuevos puestos de trabajo en un escenario de HVR. Para el escenario LVR, sin embargo, debido al menor beneficio monetario, se calcula que se podrían generar 944 nuevos puestos de trabajos en el rubro, esto es solo un 14% del escenario de HVR.

⁴⁵ Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, y como se ha descrito en el capítulo 4.1, el costo de la mano de obra en Chile es menor que en Europa, lo que significa que esta estimación refleja un cálculo conservador y el número de trabajos en ambos escenarios puede ser mayor.

Tabla 19: Creación de trabajo por escenario, fuente: elaboración propia según (European Comission DG ENV, 2011)

ESCENARIO	BENEFICIO (UF)	CREACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO (N°)
HVR	754,780	6,700
LVR	106,351	944

Beneficios medioambientales:

Sin entrar a un cálculo específico de los impactos ambientales de los dos escenarios, se puede destacar que el HVR reduce el impacto ambiental de los residuos de módulos FV de forma importante en comparación con el escenario LVR. Lo anterior debido a que un tratamiento de alto niveles de reciclaje reduce el volumen de residuos que se disponen en rellenos de seguridad, lo que disminuye el peligro de su filtración al medio ambiente. De igual modo, la recuperación de materiales para la producción de nuevos productos es parte de la economía circular, donde los recursos naturales ya utilizados siguen en el ciclo de producción y se reduce por lo mismo, la extracción de recursos vírgenes.

5 Plan de acción

A lo largo del estudio, fue expuesta la realidad nacional e internacional en cuanto al manejo adecuado, el reciclaje, la reutilización y la disposición final de los módulos fotovoltaicos que completan su vida útil, enrostrando que es un tema incipiente y de preocupación para diversos organismos y países. En vista de ello, en este capítulo se abordan ciertas conclusiones recogidas por el equipo consultor y acciones que se han tomado en otros países para avanzar en el tratamiento de módulos fotovoltaicos al fin de su vida útil, con tal de abordar correctamente la temática en el corto, mediano y largo plazo, así como una suerte de hoja de ruta para los próximos años.

5.1 Desafíos por abordar

En la investigación realizada, se logró levantar diversos desafíos que enfrenta el país para lograr una correcta aproximación al tratamiento de módulos fotovoltaicos, una vez que alcanzan el fin de su vida útil. A continuación, son expuestos cada uno de los desafíos levantados, junto con una breve conclusión al respecto.

5.1.1 Creación y actualización de una base de datos de módulos FV y sus características

Uno de los principales desafíos detectados y enfrentados por el equipo consultor, fue la creación de una base de datos consolidada y confiable de módulos fotovoltaicos que se encuentran en funcionamiento en el país, inyectando energía eléctrica a los diversos sistemas.

Si bien, el sector eléctrico chileno cuenta con una gran información técnica y catastro de proyectos de todo tipo, con tal de caracterizar e identificar los módulos fotovoltaicos existentes en el país, se detectó lo siguiente:

- Diversos organismos informan y reportan los proyectos fotovoltaicos existentes en el país, con distintos niveles de profundidad e inconsistencias en la información.
 - La Comisión Nacional de Energía (CNE), ya sea en su sitio web y en el sitio Energía Abierta, y el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), concentran el catastro de proyectos PMG, PMGD y de Gran Escala. No informan el número de módulos de cada proyecto o la tecnología de ellos.
 - La Superintendencia de Electricidad y Combustibles entrega la información de proyectos del tipo netbilling. Informa el número de módulos y la tecnología de ellos.
- El Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), en las respectivas Resoluciones de Calificación Ambiental informa los antecedentes de los proyectos fotovoltaicos mayores a 3 MW:

- No coincide en algunos casos con lo reportado por la CNE y el CEN en cuanto a potencia instalada.
- No todos los proyectos con RCA aprobada informan los mismos parámetros o antecedentes. Por ejemplo, hay proyectos que informan el número y tecnología de módulos fotovoltaicos que instalarán, y otros no lo informan.

A modo de conclusión, el equipo consultor sugiere que se debería avanzar en los siguientes puntos, con tal de que el país cuente con una caracterización adecuada de los módulos fotovoltaicos que actualmente se encuentran instalados.

1. Dar las directrices al SEIA para que los desarrolladores de proyectos proporcionen y se les exija la misma información acerca de sus proyectos. Al menos, número de módulos fotovoltaicos que se instalarán y la tecnología de estos (en base a silicio, capa fina u otra).
2. Definición de un registro unificado y actualizado de proyectos fotovoltaicos en Chile, con número de módulos informado, la tecnología de estos y su comuna de emplazamiento. Agrupando los proyectos del tipo PMGD, PMG y Gran Escala, con actualización periódica.
3. Catastro de otros módulos fotovoltaicos de tamaño menor o de otras características a los estudiados en esta Consultoría. En este punto se encuentran los proyectos fotovoltaicos del tipo off-grid (no conectados a la red eléctrica) o módulos que se encuentran asociados a otro tipo de instalaciones, por ejemplo: antenas de telecomunicaciones o luminarias.

5.1.2 Certificación de la reciclabilidad de módulos FV

Otro desafío detectado a lo largo del estudio corresponde a la existencia de una certificación de reciclabilidad de los módulos fotovoltaicos, en cuanto a todas las componentes que lo conforman. Específicamente, tiene relación con que actualmente no hay claridad de si los módulos que se encuentran instalados en el país y los que se encuentran por instalar en el futuro, es posible reciclarlos en su totalidad o en qué porcentaje.

Tal como se revisó en el estudio, este no es solo un desafío que se encuentra enfrentando Chile, es una problemática a nivel internacional. Asimismo, existen algunas compañías como PV Cycle, que han podido entregar ciertas certificaciones a proyectos que se instalan en Europa y otras regiones, con tal de garantizar la reciclabilidad de los módulos fotovoltaicos que emplean.

Se recomienda avanzar en esta temática a nivel nacional, principalmente considerando la implementación de la jerarquía en el manejo de residuos con indicadores y medios de verificación a través de la implementación de certificaciones de la preparación para la reutilización, reutilización y reciclabilidad de módulos fotovoltaicos que se instalen:

1. Exigir a los importadores de módulos fotovoltaicos, que informen a la autoridad competente la materialidad completa del equipo que ingresaron al país, con tal de conocer todos los componentes de este.
2. Establecer contacto con empresas certificadoras de reciclabilidad de módulos fotovoltaicos que existen en el mundo, con tal de analizar sus planes de arribo al país (ej. PV Cycle).
3. Exigir a los desarrolladores de proyectos fotovoltaicos PMGD, PMG y de Gran Escala, que incluyan un plan con acciones de prevención (basadas en el diseño de los productos) y valorización de módulos fotovoltaicos. Esto puede ser a través de la respectiva DIA o EIA, que sea concordante con otras experiencias que ha sostenido el productor de los módulos que instalaran, acorde a la tecnología y materialidad de estos.

5.1.3 Definición y homologación de vida útil de los módulos fotovoltaicos en Chile

Tal como fue expuesto a lo largo del estudio, y en particular en las secciones respectivas de este informe, uno de los desafíos críticos en la materia, es que no existe una definición particular de cuál es la vida útil de los módulos fotovoltaicos o cuando dejan de operar estos. Según lo abordado, este último dato es desconocido en la actualidad, no obstante, los desarrolladores de plantas fotovoltaicas en Chile han declarado en las respectivas RCA de sus proyectos, un amplio rango de vida útil esperada para sus proyectos.

Si bien, tal como mencionan los productores, un módulo fotovoltaico puede operar correctamente en un período superior a los 30 años, no obstante, se desconoce el criterio utilizado por los desarrolladores de proyectos en Chile para establecer una vida útil en sus RCA (ej. Financiero o técnico). Este último aspecto es crítico y necesario para establecer una estrategia de tratamiento de módulos fotovoltaicos con la anticipación debida, ya que se desconoce si los propietarios extenderán la operación de sus proyectos fotovoltaicos más allá de lo declarado en sus RCA (actualizándolas por ej.) o darán de baja los módulos y la central completa.

A modo de recomendación, el equipo consultor sugiere que se defina correctamente el concepto de vida útil de los módulos fotovoltaicos, por medio de los siguientes puntos:

1. Exigir la incorporación en la respectiva RCA, dentro del plan de cierre de un proyecto fotovoltaico, de la vida útil estimada para los módulos fotovoltaicos que instalarán y el criterio escogido para determinarla (económica, técnica o ambiental).
2. Monitorear con los importadores de módulos fotovoltaicos en Chile, la vida útil que estiman los respectivos productores para sus módulos. Específicamente el período de tiempo en que dejará de operar el módulo. Esto es especialmente crítico para establecer

estrategias de reutilización de los módulos fotovoltaicos que aún se encuentren en condiciones de operar luego de ser dados de baja por alguna empresa o persona.

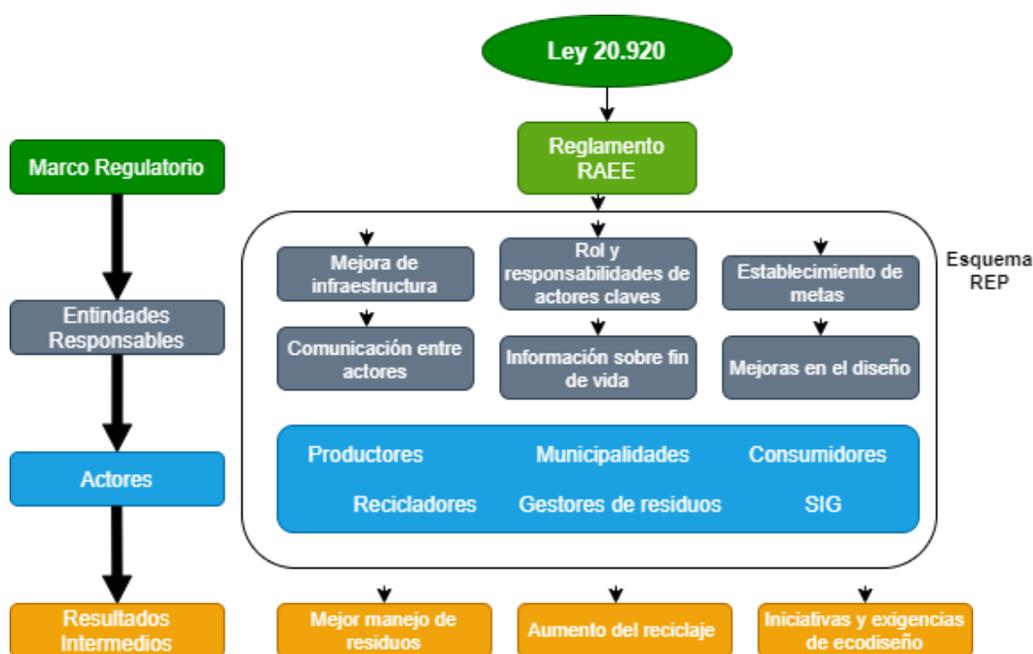
5.1.4 Definición de la implementación de la REP en Chile

A diferencia de otras industrias, los residuos fotovoltaicos son únicos porque tienen un largo tiempo de desfase, desde que se produce e instala hasta que termina su vida útil. Como se puede ver en la proyección de residuos y dejando de lado el mínimo descarte por fallas, los primeros residuos FV masivos se comienzan a ver en 2042. Esta situación, sumada al uso de algunos materiales, algunos de ellos peligrosos, que generarían impactos al medio ambiente en caso de no ser regulados. En el mundo, muchos gobiernos incluyen a los módulos FV como parte de los productos regulados por leyes de responsabilidad extendida del productor.

En Chile, los módulos FV están regulados en el marco de la Ley 20.920, para la gestión de residuos, responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Si bien todavía en la Ley 20.920 son Aparatos Eléctricos Electrónicos, uno de los productos prioritarios sujetos de obligaciones y metas, el transitorio segundo de la ley 20.920 establece la obligación a los productores de AEE de declarar las 6 categorías, donde módulos FV corresponden a la categoría 4. En este se establece la categoría de módulos fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm). A su vez se indica una subcategoría en cuanto a su composición: módulos fotovoltaicos con silicio y módulos fotovoltaicos con telurio de cadmio.

Un esquema que explica los distintos elementos que confluyen en la implementación de un esquema REP y que pueden asimilarse a la Ley 20.920 que tenemos en Chile se presenta a continuación.

Figura 17. Esquema teórico de un esquema de REP para módulos FV en Chile⁴⁶



Las metas que a este respecto se establezcan, claramente incentivarán el reciclaje de los módulos FV en Chile. Sin embargo, su aplicación real no será inmediata, ya que, como se explicó anteriormente, la duración de esta tecnología resultará en que se generen residuos de este tipo en gran cantidad recién el 2042 (i.e. usando la estimación de vida útil de 30 años). Esto significará que, es muy probable que para esa fecha las metas para los RAEE ya hayan alcanzado tasas máximas o planas cercanas al 80%.

La industria fotovoltaica, además de tener que hacerse responsable por los residuos generados en el futuro también puede obtener un beneficio mediante la reutilización y reciclaje de los módulos FV. Como se ha podido apreciar en el análisis realizado, el costo de eliminación en rellenos de seguridad hoy día es menor que el costo de reciclar los módulos, por lo que a simple vista se puede ver como un desincentivo al reciclaje. Sin embargo, a partir del balance de costos y potenciales ingresos realizado se obtiene un valor positivo de los residuos respecto a los costos de reciclaje de alto estándar técnico. De todas formas, este análisis se debe profundizar ya que no considera los costos logísticos que podrían traducirse en un balance negativo para el reciclaje en el caso de reciclaje más básico (LVR). Es precisamente en los casos de LVR, en que las metas de recolección y reciclaje de módulos FV pueden representar un incentivo para avanzar hacia formas de reciclaje más intensivas que logren mayores tasas de recuperación.

Es complejo hablar de si el mercado de módulos FV en Chile va a internalizar o no los costos asociados al reciclaje o de la aplicación completa de las obligaciones que deriven de la Ley 20.920. El grado de incertidumbre asociado al mercado de materiales y de las tecnologías de reciclaje

⁴⁶ Adaptado de: Mehta S, IIIEE Theses IMEN56 20171 The International Institute for Industrial Environmental Economics, 2017

hacen complejo cualquier proyección. Sin ir más lejos, hace 20 años nadie hubiera proyectado el descenso en los precios de los mismos módulos FV.

Más complejo aún es estimar el momento en que estos costos se pudieran incorporar y de qué forma aseguran una operación que se llevará a cabo 25 o 30 años después de la introducción de esos módulos en el mercado.

No obstante, lo señalado en los párrafos precedentes, se puede realizar un ejercicio hipotético de cuánto podría significar traspasar el costo de reciclaje en valor presente. De acuerdo a las cifras de valor de reciclaje de la Comisión Europea (2011), si se internaliza su costo en el valor de mercado de cada módulo, existiría un sobre costo de \$ 465 por módulo FV en un escenario de LVR y un sobre costo de \$ 2.615 en uno de HVR. Es importante considerar que estos valores sólo implican el sobre costo del reciclaje o ecotasa asociada al reciclaje y no de otros costos asociados como el de recolección, transporte, almacenamiento y disposición en rellenos de seguridad de la fracción residual no reciclable. Tampoco da cuenta del costo de licencia dentro del Sistema de Gestión asociado que involucra otros tipos de costos como los de administración y comunicación, además de los ya mencionados.

A modo de conclusión se puede decir que si bien los alcances normativos que se refieran al fin de vida de los módulos FV, no son el foco central del estudio, si se entregan antecedentes que dan cuenta de un tratamiento especial de los FV en lo que respecta a legislación comparada. Dicho esto, los antecedentes que se acompañan buscan ser un aporte para la discusión reglamentaria, en tanto dan cuenta de la forma en que otros países han enfrentado el desafío que implica el fin de vida de estos módulos. Tal vez uno de los aspectos más importantes que resaltar dice relación con la forma en que se puede evitar las posibles distorsiones de mercado en los Sistemas de Gestión que pudiera generar la oportunidad en que se produzca la obligación con respecto a los módulos FV.

Como señala la legislación española⁴⁷: “se ha considerado adecuado separar los paneles fotovoltaicos en una nueva categoría dada la singularidad de este tipo de aparatos, de larga vida media y perfil profesional para que no distorsione las cuotas y objetivos de recogida anuales del resto de aparatos eléctricos con características más similares.

5.1.5 Definición del impacto ambiental de los componentes de módulos fotovoltaicos

Tal como se abordó en el capítulo 3 del presente informe, existe claridad de los impactos ambientales de las componentes de módulos fotovoltaicos que existen actualmente en el mercado. No obstante, su impacto depende de las condiciones a las que está sometido el módulo dado de baja y de la gestión que se realice luego del fin de su vida útil.

⁴⁷ Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. BOE-A-2015-1762

Asimismo, solo existe claridad de los impactos de los módulos que están en operación actualmente en el mercado, pero otras tecnologías que se encuentran en desarrollo pueden presentar otros desafíos ambientales que se desconocen con detalle a priori. Por ejemplo, los módulos llamados de tercera generación, que contienen Galio, Indio y Selenio en sus componentes, u otros en desarrollo aún más incipiente, que tienen como perovskita como material.

Se recomienda abordar los impactos ambientales que tienen las componentes de los módulos fotovoltaicos una vez son preparados para la reutilización, reutilizados o reciclados, a través de los siguientes puntos:

1. Exigir en las Declaraciones de Impacto Ambiental o en las Evaluaciones de Impacto Ambiental, un plan para la disposición final de los módulos fotovoltaicos, considerando los impactos ambientales de las componentes de estos y las condiciones ambientales a las que estarán sometidos en tal etapa.
2. Realizar una continua vigilancia tecnológica de las nuevas alternativas de módulos fotovoltaicos que se proyectan en el mundo y Chile, con tal de conocer a priori sus características técnicas, composición de materiales e impacto ambiental de estos.

5.1.6 Recolección, transporte y almacenamiento de los residuos

Según la propuesta realizada en la sección 4 del presente informe, uno de los grandes desafíos en el tratamiento de módulos fotovoltaicos es la logística previa asociada al tratamiento de módulos fotovoltaicos. En detalle existen dos aspectos que se deben tomar en cuenta a la hora de abordar este tema, como lo son:

- La distribución geográfica de los proyectos e instalaciones fotovoltaicas. Específicamente, la logística de la recolección de los módulos fotovoltaicos que lleguen al final de su vida útil dependerá de la región o macrozona geográfica en que estos se encuentren, con la finalidad de establecer centros de acopio u otras alternativas.
- La escala de los proyectos fotovoltaicos. Particularmente, es relevante considerar de forma separada una estrategia para la recolección de módulos asociados a instalaciones netbilling versus otras de gran escala (incluyendo PMG y PMGD). Las primeras se encuentran repartidas en diferentes puntos de una localidad particular y las segundas tienen una alta concentración de módulos en una sola zona, dado que se encuentran asociados a proyectos que tienen órdenes de magnitud de miles o millones de módulos.

Se recomienda lo siguiente para abordar correctamente los desafíos de recolección, transporte y almacenamiento de módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil:

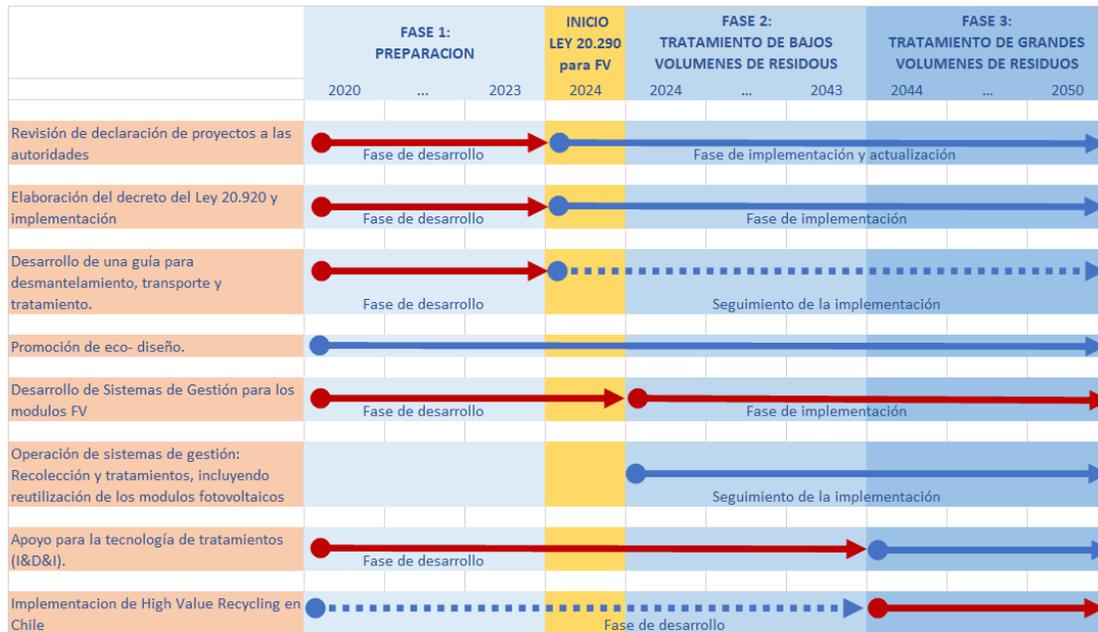
1. Establecer, por parte de la autoridad, una estrategia de recolección de módulos descartados de instalaciones del tipo netbilling, estableciendo recomendaciones, indicaciones y lineamientos a los usuarios finales.
2. Exigir estrategias de adecuado transporte de módulos fotovoltaicos que lleguen al final de su vida útil a los desarrolladores de proyectos, dejándolas establecidas en sus respectivas RCA. Este transporte, debe ser considerado desde la planta fotovoltaica hasta un punto de acopio genérico.
3. Establecer los criterios mínimos que debe poseer una instalación de acopio de módulos fotovoltaicos que lleguen al final de su vida útil, previo a su tratamiento. Esto en cuanto a que deben satisfacer criterios de resguardo, que permitan evitar los impactos ambientales descritos en la sección 3 del presente informe.

5.2 Propuesta de plan de acción

A modo de resumen de lo expuesto, en este informe en cuanto a las estrategias analizadas en la sección 4 y a los desafíos detectados, es que se propone un cronograma general que aborde tres fases de corto, mediano y largo plazo para el tratamiento de módulos fotovoltaicos en Chile que llegan al fin de su vida útil:

- **Fase 1: Preparación.** Esta etapa estimada para el corto plazo tiene en cuenta desarrollar y preparar los aspectos previos a la entrada en vigor de la Ley 20.290 para módulos fotovoltaicos en el país.
- **Fase 2: Tratamiento de bajos volúmenes de residuos.** En base a los casos expuestos de generación de residuos asociados a los módulos fotovoltaicos que llegan al fin de su vida útil, es que habrá una fase en el mediano plazo en donde se traten volúmenes pequeños. Principalmente asociados a módulos dados de baja en la forma de “early loss” o pérdida temprana (abordado en sección 4.2).
- **Fase 3: Tratamiento de grandes volúmenes de residuos.** Según los escenarios expuestos, se prevé que habrá una fase en donde grandes volúmenes de módulos fotovoltaicos lleguen al fin de su vida útil y que deberán ser tratados de forma adecuada. En esta etapa es en donde se esperan los grandes desafíos de logística en cuanto a la recolección, transporte y almacenamiento de tales módulos.

Figura 18: Actividades preparatorias sugeridas para el reciclaje de módulos fotovoltaicos en Chile



6 Referencias

- Arvind Sharma, S. P. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 597-610.
- Asociación de Normalización Española. (1 de Diciembre de 2017). *UNE-EN 50625-2-4:2017 (Ratificada)*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059305>
- Barrera, M., Pajares, L., Clemente, Ó., de Castro, A., López, V., & Fuentes, F. (2007). *Fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos*. Universidad de Jaume, España.
- Bruton, T. (1994). Re-cycling of high value, high energy content components of silicon PV modules. *Proceedings of 12th EC-PVSEC*, 303-304.
- Bundesverband Solarwirtschaft BSW. (2019). *Sicherer Umgang mit PV-Altmodulen*.
- California Legislative Information. (1 de Octubre de 2015). *SB-489 Hazardous waste: photovoltaic modules*. Obtenido de https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160SB489
- Chowdhury, S., Sajedur Rahman, K., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., . . . Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*.
- CITUC. (2016). *Guía de Respuesta en Caso de Emergencia*.
- CNE. (27 de Mayo de 2020). *CNE - Estadísticas Electricidad*. Obtenido de Capacidad Instalada de Generación: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>
- CNE. (2020). *Reporte Mensual Sector Energético*.
- Dias, P., & Veit, H. (2019). Recycling Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Emerging Photovoltaic Materials*, 61-102.
- Dias, P., Schmidt, L., Bonan Gomes, L., Bettanin, A., Veit, H., & Moura Bernardes, A. (2018). Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*.
- Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Mater*, 397-403.
- Doni, A., & Dughiero, F. (2012). Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*.
- Energía Abierta. (14 de 05 de 2020). *Generación Distribuida - Instalaciones Inscritas*.
- EPA. (Agosto de 2019). *A Survey of U.S. Policies and Initiatives*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/heath_2_state_programs_0.pdf

- European Commission. (27 de Enero de 2003). DIRECTIVA 2002/95/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 37/19-L 37/23.
- European Commission. (19 de Noviembre de 2008). DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 312/3- L 312/30.
- European Commission DG ENV. (2011). *Study on the photovoltaic panels supplementing the impact assesment for a recast of the WEEE directive*. Paris: Bio Intelligence Service.
- European Commission DG ENV. (2011). *Study on Photovoltaic Panels Supplementing the Impact Assessment for a recast of the WEEE Directive*.
- First Solar. (2017). *The Recycling Advantage*.
- Fthenakis, V. M. (2000). *End-of-life management and recycling of PV modules*.
- Fthenakis, V., & Zweibel, K. (2017). CdTe PV: Real and Perceived EHS Risks. En N. C. Meeting (Ed.). Obtenido de www.nrel.gov/docs/fy03osti/33561.pdf
- Glass Packaging Institute. (5 de Agosto de 2020). *Glass Recycling Facts*. Obtenido de <https://www.gpi.org/glass-recycling-facts>
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Mater*, 123: 239-48.
- IEA. (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*.
- IRENA. (2016). *End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels*.
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). *Renewable capacity statistics 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).
- IRENA and IEA-PVPS Task 12. (2016). *End-of-Life_Solar_PV_Panels*.
- Kaczmar, S. (2011). Evaluating the Read-Across Approach on CdTe Toxicity for CdTe Photovoltaics. *SETAC North America 32nd Annual Meeting*. Boston, US. Obtenido de <ftp://ftp.co.imperial.ca.us/icpds/eir/campo-verde-solar/final/evaluating-toxicity.pdf>
- Kim, Y., & Lee, J. (2012). Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Mater*, 317-322.
- Komoto, K. (29 de November de 2018). PV Recycling in Japan. *IEA PVPS Task12: PV Sustainability*. Tokyo, Japan: Mizuho Information & Research Institute, Inc.
- Latunussa, C., Ardente, F., Blengini, G., & Mancini, L. (2016). Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Mater*, 101-111.
- Latunussa, C., Mancini, L., Blengini, G., Ardente, F., & Pennington, D. (2016). *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels*.

- Lu, L.-T. (2019). *Photovoltaic Waste Management and Implementing Extended Producer Responsibility in the Solar Industry in California*.
- Maurer, A., & Schlummer, M. (2004). Good as New-Recycling Plastics from WEEE and Packaging Wastes. *Waste management world*, 33-44.
- McKinsey Global Institute. (21 de Agosto de 2017). *China's renewable energy revolution*. Obtenido de <https://www.mckinsey.com/mgi/overview/in-the-news/china-renewable-energy-revolution#>
- Ministerio de Energía. (9 de Junio de 2020). *Planificación Energética de Largo Plazo*. Obtenido de <https://www.energia.gob.cl/planificacion-energetica-de-largo-plazo-escenarios-energeticos>
- Mizuho Information & Research Institute, Japan. (2016). Approaches to PV Waste Management. *Workshop on PV End-of-Life Management*. Munich, Alemania.
- Monteiro, M., Alvarez-Gaitan, J., Bilbao, J., & Corkish, R. (2018). A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules.
- NC Clean Energy Technology Center. (2017). *Health and Safety Impacts of Solar Photovoltaics*. NC State University.
- NREL. (2012). Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- Palitzsch, W., & Loser, U. (2014). Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen (Integrated reuse of high-tech and green-tech waste). *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge*, 173-81. Obtenido de http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39704-2_12
- Pinho JT, G. (2014). Engineering manual for photovoltaic systems retrieved from Rio de Janeiro: CEPEL—CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.
- PV Cycle. (2018). *Annual Report*.
- PV Cycle. (13 de Julio de 2020). *PV Cycle Association*. Obtenido de <http://www.pvcycle.org/es/>
- PV Magazine. (20 de Julio de 2018). *Top 10 crystalline PV module manufacturer ranking*. Obtenido de <https://www.pv-magazine.com/2018/07/20/top-10-crystalline-pv-module-manufacturer-ranking/>
- Regenerativa. (2018). *Desafíos para la implementación de la Ley 20.920 para el sector de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Santiago de Chile.
- Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (17 de Julio de 2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 597-610. doi:10.12720/sgce.8.5.597-610
- Shin, J., Park, J., & Park, N. (2017). A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Mater*, 1-6.

- Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2934-2945.
- Solar Energy Industries Association. (2019). *PV End-of-Life Management*.
- Solar Energy Industries Association. (13 de Julio de 2020). *SEIA National PV Recycling Program*. Obtenido de <https://www.seia.org/initiatives/seia-national-pv-recycling-program>
- Solarity. (10 de Junio de 2020). *Trends for PV Industry in 2020*. Obtenido de <https://solarity.cz/blog/trends-for-pv-industry-in-2020/>
- State of Washington. (17 de Julio de 2017). ENGROSSED SUBSTITUTE SENATE BILL 5939. *RENEWABLE ENERGY--TAX INCENTIVES--FEES*. Seattle, Estado de Washington , Estados Unidos.
- Suys, M. (2010). Recycling valuable metals from thin film modules. *1st international conference on PV Module Recycling*.
- Tao, J., & Yu, S. (2015). Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Mater*, 108-124.
- The Aluminium Association. (6 de Agosto de 2020). *Recycling*. Obtenido de <https://www.aluminum.org/industries/production/recycling>
- U.S. Department of Energy. (14 de Mayo de 2020). *Solar Energy Technologies Office*. Obtenido de Cadmium Telluride: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- UNECE. (2007). *Peligros para la salud*.
- Union Europea. (4 de Julio de 2012). *Diario Oficial de la Union Europea*. Obtenido de Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- VDMA. (2019). *International Technology Roadmap for Photovoltaic*.
- Wang, T., Hsiao, J., & Du, C. (2012). Recycling of materials from silicon base solar cell module. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*.
- Yingli Solar. (2017). *Yingli Solar PV Module Limited Warranty*.