



Resumen Ejecutivo

Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil

Equipo de Proyecto

Ciente

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

1 Introducción

A marzo de 2020 en Chile se encontraban instalados 3 [GW] de proyectos de generación solar fotovoltaica, alcanzando un 11% de participación en el total país. Junto a esto, se encuentran en construcción cerca de 2.8 [GW] de tal tipo de proyectos, lo que a fines del año 2020 hará que su capacidad en el país se duplique. Asimismo, según proyecciones del Ministerio de Energía, de aquí al año 2050 se espera que se instalen entre 11 [GW] a 18 [GW] de proyectos fotovoltaicos.

En vista de las enormes perspectivas que tiene esta tecnología, es que de interés anticiparse a diversos desafíos tanto técnicos, sociales y ambientales. Es en este último aspecto en que se presenta una problemática que en el mundo se está comenzando a discutir y trabajar, la cual es el tratamiento de los módulos fotovoltaicos luego que lleguen al fin de su vida útil.

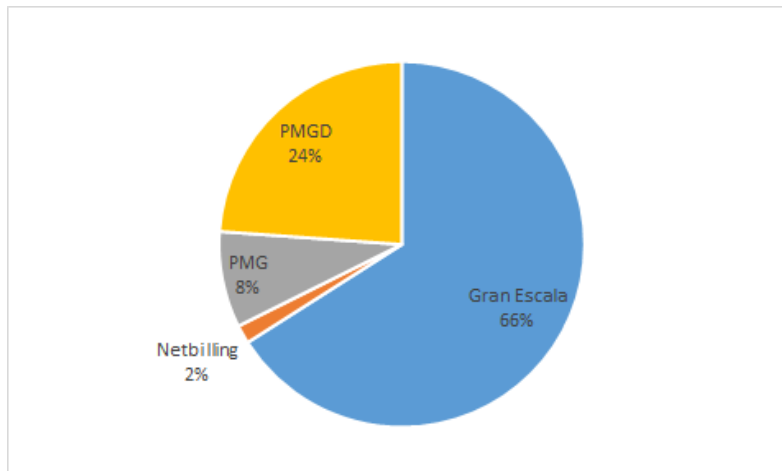
Si bien en la actualidad en Chile y el mundo, el volumen de módulos fotovoltaicos que ha llegado al final de su vida útil es acotado, dado que la entrada masiva de este tipo de tecnología es algo que ha sucedido solo en la última década, es un desafío que se debe abordar de forma anticipada con tal de analizar las aristas tecnológicas, regulatorias, ambientales y logísticas.

En vista de lo anterior, es que el Ministerio de Energía, con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo, encargó el presente estudio con la finalidad de analizar las diversas alternativas para el tratamiento de módulos fotovoltaicos en Chile.

2 Línea base de módulos FV en Chile

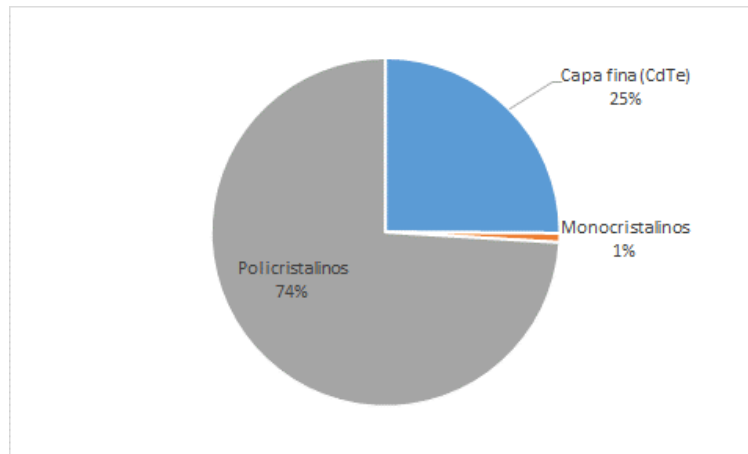
De los 3 [GW] de proyectos solares fotovoltaicos que se encuentran instalados en Chile a marzo de 2020, más de un 65% corresponden a proyectos de gran escala y en un menor porcentaje se tienen proyectos del tipo netbilling (principalmente en techos).

Figura 1: Distribución de la capacidad instalada de proyectos fotovoltaicos según tipología a marzo 2020.



De tales proyectos instalados en Chile, se tiene que la tecnología de módulos fotovoltaicos del tipo policristalinos es la que predomina con casi un 75% de los casi 12,508,000 módulos que existen en el país, seguidos del tipo capa fina y en menor medida monocristalinos.

Figura 2: Participación del tipo de módulos en total de módulos fotovoltaicos instalados en Chile a marzo de 2020.



De tales módulos y tecnologías, se conoce la composición de ellos de forma aproximada, la cual varía en menor medida dependiendo del fabricante o de período de fabricación. En vista de ello, se conoce la composición de materiales al año 2020 de todos los módulos fotovoltaicos instalados en Chile, siendo el vidrio el componente con mayor presencia.

Tabla 1: Estimación de materiales empleados en los módulos actualmente instalados en Chile a marzo de 2020

Material	Estimación total país a marzo 2020 [toneladas]	
	Cristalino Unifacial ¹	Capa Fina CdTe
Vidrio	145,228	100,439
Polímeros (EVA, Tedlar)	14,991	S/I
Aluminio	20,613	9,416
Silicio	4,198	S/I
Cobre	1,259	S/I
Plata	12	S/I
Boro	210	S/I
Fósforo	210	S/I
Dióxido de estaño	210	S/I

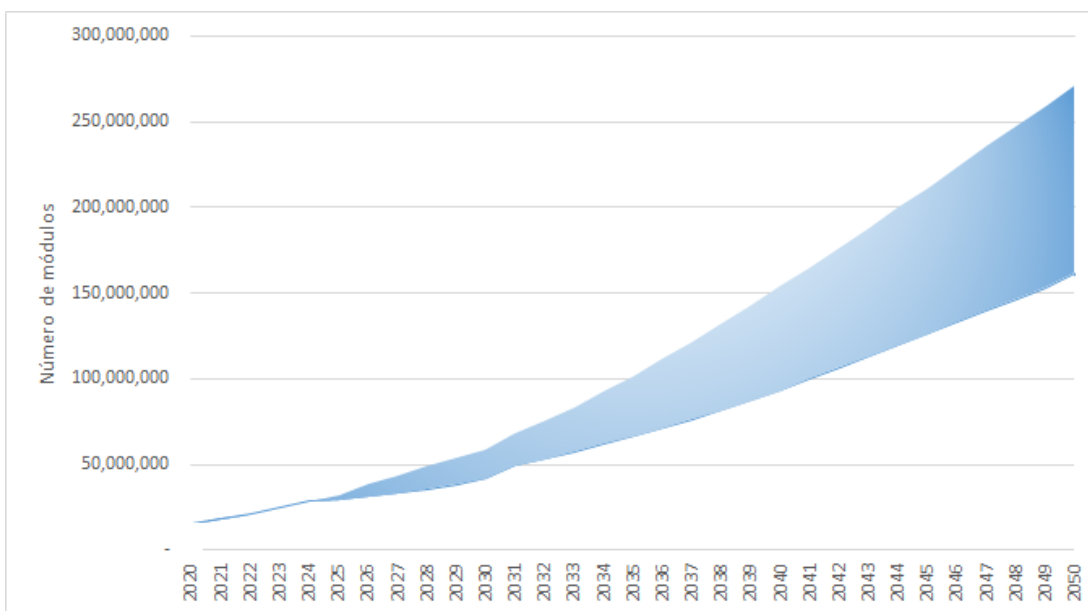
¹ Se habla de módulos cristalinos como la suma de los módulos monocristalinos y policristalinos.

Plomo	210	S/I
Estaño	210	S/I
Cadmio	0	5
Telurio	0	123

3 Proyección de módulos FV en Chile

A partir del año 2020 hasta el año 2050, según proyecciones del Ministerio de Energía, se espera que se instalen entre 11 a 18 [GW] adicionales de capacidad instalada solar fotovoltaica. Lo que significará un aumento sostenido del número de módulos fotovoltaicos que se encontrará instalado en el país a futuro, el cual podría fluctuar entre 161 y 270 millones de módulos al año 2050.

Figura 3: Banda de proyecciones de módulos fotovoltaicos en Chile al año 2050



Se espera que tales módulos fotovoltaicos que se instalen en el país mayoritariamente sean proyectos del tipo gran escala, PMG y PMGD, versus con una penetración, si bien creciente pero menor, de módulos asociados a proyectos netbilling (principalmente techos solares en el comercio y viviendas).

4 Experiencia internacional en el tratamiento de módulos FV

El tratamiento de módulos fotovoltaicos en el mundo es un tema emergente y que está dando sus primeros pasos en diversas economías y zonas. Lo anterior, debido a que la instalación masiva de proyectos de este tipo se ha dado en la última década y de forma amplia en todos los continentes.

En vista de ello, las principales experiencias internacionales en la materia y en cómo los países están viendo el desafío, se puede analizar ya sea desde el punto de vista práctico como regulatorio. Al respecto se tienen los siguientes casos analizados:

- **Caso PV Cycle – Unión Europea**

La empresa PV Cycle es la principal empresa que presta el servicio de recolección y tratamiento de módulos fotovoltaicos en Europa. Esta, cuenta con un sistema que comienza con puntos de captación de paneles en desuso, luego los recolecta y son transferidos a una ubicación central donde se inicia el tratamiento y reciclaje de sus componentes.

Esta empresa, presta los servicios de recolección y reciclaje de forma gratuita y abierta a todos aquellos clientes que necesiten realizar la disposición final de paneles fotovoltaicos. Asimismo, reconoce los servicios de recolección y tratamiento dependiendo de corresponden a pequeñas cantidades (proyectos en techos) y a grandes cantidades (proyectos gran escala). Actualmente PV Cycle trabaja con los fabricantes que representan el 90% de los módulos fotovoltaicos instalados en Chile.

- **Caso Alemania**

En los Estados miembros de la Unión Europea, Alemania incluida, se encuentra en vigencia la directiva RAEE 2012/19/UE. Específicamente en este país se tiene implementada la “Ley sobre comercialización, devolución y eliminación ambientalmente amigable de equipos eléctricos y electrónicos” (ElektroG).

En términos generales, la Ley sigue a la directiva europea en los puntos de gestión de los residuos y metas de recolección y reciclaje. Sin embargo, cabe destacar la metodología que se estipula, para dar cumplimiento a la responsabilidad extendida del productor respecto de los RAEE incluyendo los módulos fotovoltaicos.

La ley obliga a los productores a registrar sus productos en un registro nacional de residuos de equipos eléctricos y electrónicos y proporcionar apoyo financiero para crear y organizar la recolección y recuperación de residuos fotovoltaicos para el reciclaje adecuado para las grandes cantidades de capacidad instalada en módulos fotovoltaicos en Alemania.

- **Caso España**

Al igual que en el caso de Alemania, en España se encuentra en vigencia la directiva RAEE 2012/19/UE, implementada a través del Real Decreto 110/2015. También se han adoptado

las definiciones y obligaciones según la directiva europea, sin embargo, la implementación de la responsabilidad de los productores sobre el fin de vida de módulos fotovoltaicos obedece a otra metodología que en Alemania.

La normativa indica la necesidad de disponer de instalaciones adecuadas para el depósito y almacenamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, implicando la recolección de estos a los distribuidores y entidades locales. Por otra parte, en aplicación del principio de “quien contamina paga” (REP), se obliga al fabricante a financiar la gestión de los residuos que proceden de sus aparatos.

Asimismo, se establecen 10 categorías de AEE, donde los módulos fotovoltaicos constituyen la séptima categoría, bajo cual se diferencia entre módulos fotovoltaicos en base a silicio y los módulos en base a telurio de cadmio (CdTe). La razón de este punto se debe a que los módulos fotovoltaicos presentan una mayor vida útil y características diferentes en comparación a otros AEE, de manera que se deben separar del resto para no alterar las cuotas y los objetivos de recolección.

- **Caso Japón**

En el caso de Japón, actualmente todavía no existe una normativa o regulaciones específicas para los residuos de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, existen regulaciones de residuos en general y otros documentos elaborados por los Ministerio de Medio Ambiente (MOE) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI). Otra autoridad que juega un rol en la elaboración de regularizaciones en el tema es el Ministerio de Asuntos internos y Comunicaciones (MIC).

Los residuos de módulos fotovoltaicos deben ser tratados bajo el marco regulatorio general para la gestión de residuos: "Ley de Gestión de Residuos y Limpieza Pública" (Komoto, 2018) La ley prescribe definiciones de residuos, responsabilidades de los generadores y gestores de residuos industriales, manejo de residuos industriales, incluida la eliminación de vertederos, los cuales son un problema grande todavía en japon.

Asimismo, se encuentra en vigencia la “Ley de Reciclaje de Residuos de Construcción”, la que establece como gestionar los residuos de construcción y desmantelamiento de obras. La Ley exige la recuperación y el reciclaje de hormigón, madera y materiales de construcción (que contengan hormigón, hierro y asfalto). Aunque los módulos fotovoltaicos no están específicamente tipificados en la Ley, los módulos fotovoltaicos integrados con material de construcción pueden requerir reciclaje, de acuerdo con las interpretaciones actuales. Por lo que los módulos en plantas fotovoltaicas montadas en el suelo no se ven afectados por esta regulación. Sin embargo, los componentes del sistema hechos de concreto o hierro también estarían sujetos a la ley.

- **Caso Estados de California y Washington, EEUU**

En los Estados Unidos no existe una ley específica que regula los residuos de módulos FV al nivel nacional, ni tampoco regulaciones que exijan la recolección y el reciclaje de módulos FV al final de su vida útil.

Por lo tanto, parecido a la situación en Japón, los módulos fotovoltaicos deben eliminarse de acuerdo con el marco legal para la gestión de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos (Ley de Conservación de Recursos).

Sin embargo, hay estados que han avanzado más que otros en el tema. Especialmente en California y el Estado de Washington hay iniciativas que apuntan a una regulación más detallada sobre el manejo de los residuos de módulos FV.

5 Proyección del fin de vida útil de módulos FV en Chile

Los módulos fotovoltaicos corresponden a un AEE que a la vez son empleados a modo de inversión de largo plazo y generan un ingreso o rentabilidad producto de su uso. Además, corresponden a una tecnología que recién en la última década ha tenido una penetración considerable, por lo que no existen experiencias de una salida masiva de módulos fotovoltaicos en el mundo.

En vista de esto, en Chile y el mundo, se tienen diversos enfoques y abordajes de la vida útil de los módulos fotovoltaicos, principalmente en cuanto a:

- **Vida útil informada por fabricantes**

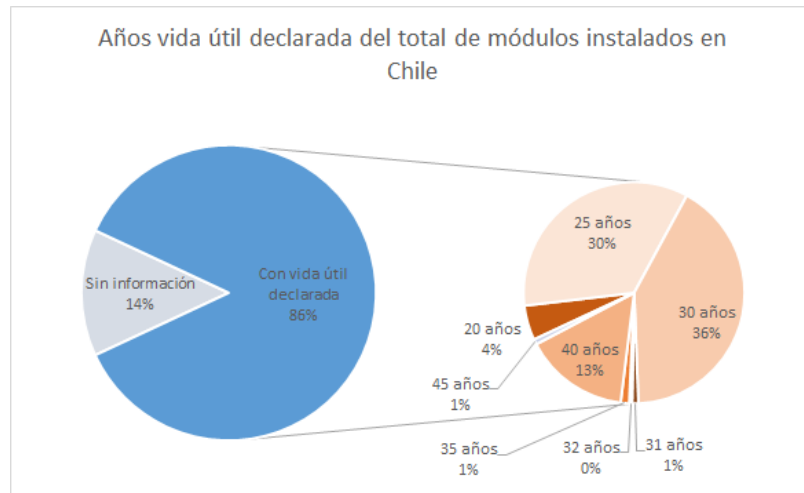
Los fabricantes de módulos fotovoltaicos no declaran en sus fichas técnicas de productos, cual será la vida útil efectiva de estos (i.e. cuando dejarán de operar dada una degradación total).

No obstante, entregan información de que los módulos al cabo de 25 años seguirán funcionando con un rendimiento superior al 80% (Garantía de Rendimiento). Asimismo, señalan en sus Garantías de Fabricación, que los módulos operarán 10 años sin desperfectos de fábrica.

- **Vida útil declarada por los desarrolladores de proyectos**

Los proyectos fotovoltaicos tienen una vida útil que se encuentra declarada por sus propios desarrolladores a la hora de realizar la tramitación ambiental respectiva. En Chile, este dato fluctúa y varía caso a caso, teniendo que más del 50% de los módulos tienen una vida útil declarada de al menos 30 años.

Figura 4: Participación del número de módulos fotovoltaicos según la vida útil declarada de los proyectos respectivos



- **Vida útil financiera-contable**

En conjunto con la vida útil declarada por los fabricantes y por los mismos desarrolladores de proyectos fotovoltaicos, es que también se define por estos últimos, una vida útil asociada a aspectos financiero-contables de los proyectos. Es decir, cuantos años consideran para la depreciación del respectivo activo o para la evaluación económica del proyecto (ej. payback).

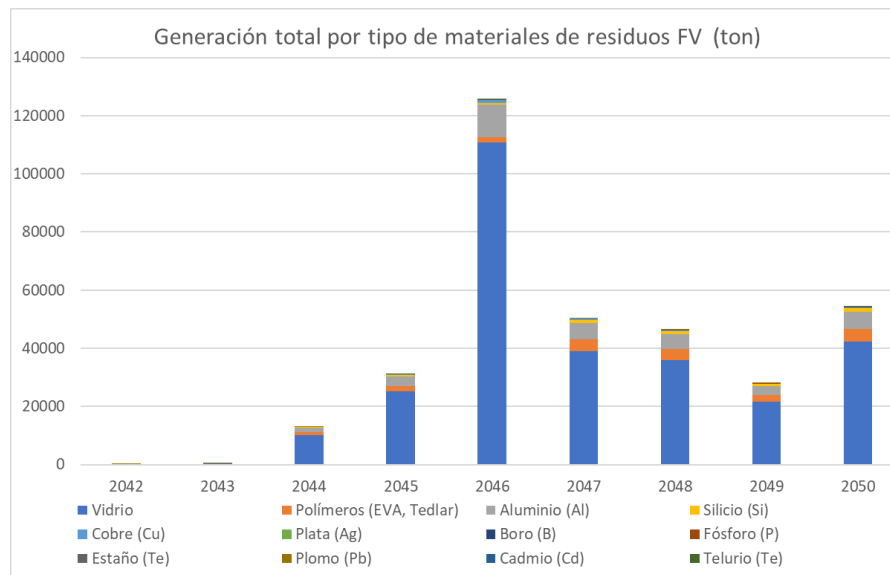
Asimismo, en Chile se observa que los desarrolladores de proyectos fotovoltaicos consideran una vida útil de 20 a 25 años para evaluar financieramente el proyecto fotovoltaico y analizar sus flujos futuros. No obstante, tienen plazos de recuperación de la inversión en torno a 10 años o menos en algunos casos, lo cual es interesante para el análisis de posibles re-inversiones en otro tipo de módulos o tecnologías.

6 Tratamiento de módulos FV en Chile

En Chile, se espera que exista una alta generación de residuos asociados a módulos fotovoltaicos dada las enormes perspectivas que tiene esta tecnología en el futuro. No obstante, según los casos planteados en el estudio, el fin de la vida útil de los módulos que se están instalando en la actualidad podría ocurrir en casi 30 años más. Tal horizonte es de largo plazo, pero es relevante plantearse las interrogantes desde ya, debido a que Chile ya cuenta con la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley 20.920).

Tomando el caso de que el fin de la vida útil de los módulos fotovoltaicos llegará en 30 años contados desde el momento que son instalados, se tiene que los primeros volúmenes considerables de residuos asociados a estos se verán recién en el año 2046.

Figura 5: Materiales contenidos en los residuos generados de módulos FV



Dada la composición de los módulos fotovoltaicos que se comercializan en la actualidad, el mayor porcentaje de residuos que se podría generar tiene relación con vidrio, seguido de aluminio y en menor medida otros elementos como polímeros y silicio, entre otros.

Junto a esto, cabe señalar que los módulos fotovoltaicos requieren diversos procesos para realizar la separación de sus componentes una vez lleguen al final de su vida útil. Actualmente en Chile no todos los procesos de tratamiento y reciclaje ad-hoc a los módulos fotovoltaicos se encuentran disponibles o se realizan. En vista de ello, se tiene que en la actualidad no se podría realizar el tratamiento y la descomposición de todas las componentes de módulos fotovoltaicos

Tabla 2: Tipos de tratamientos y procesos de reciclaje existentes en Chile.

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

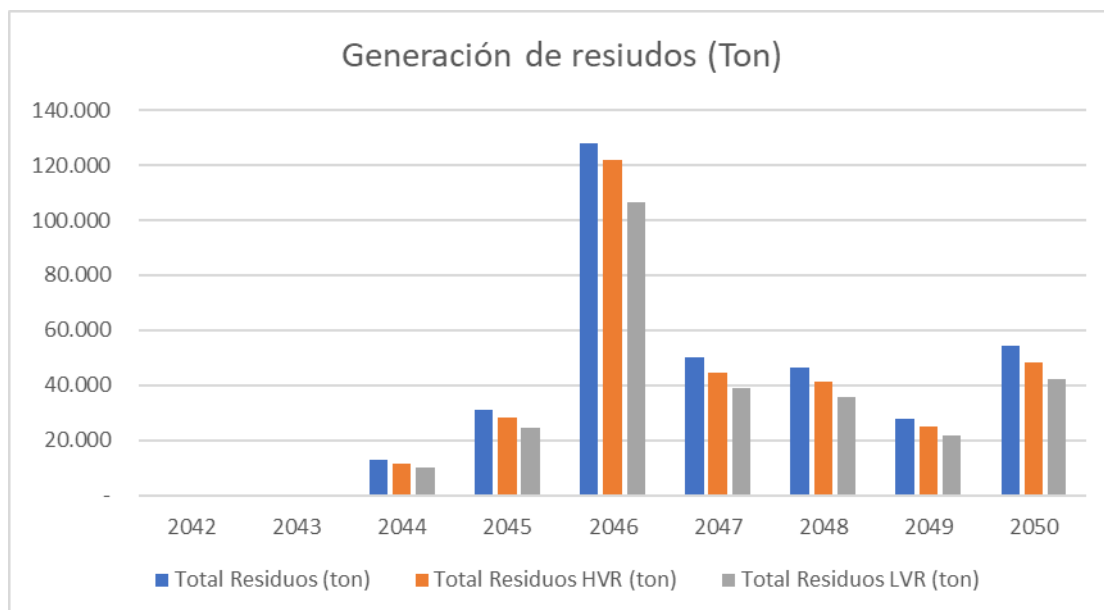
De la misma manera, existen diversas alternativas para el tratamiento y reciclaje de los componentes de módulos fotovoltaicos, dependiendo de los índices de reciclabilidad de cada componente de módulos fotovoltaicos para un reciclaje intensivo High Value Recycling (HVR) o un reciclaje básico Low Value Recycling (LVR).

Tabla 3: Porcentaje de reciclabilidad por tipo de reciclaje: High Value Recycling (HVR) y Low Value Recycling (LVR)

Componentes y materiales de módulos FV	% Reciclaje HVR	% Reciclaje LVR
Vidrio	97%	85%
Polímeros (EVA, Tedlar)	0%	0%
Aluminio (Al)	100%	100%
Silicio (Si)	85%	0%
Cobre (Cu)	78%	59%
Plata (Ag)	78%	0%
Boro (B)	0%	0%
Fósforo (P)	0%	0%
Estaño (Te)	80%	0%
Plomo (Pb)	78%	0%
Cadmio (Cd)	98%	0%
Telurio (Te)	80%	0%

Según tales porcentajes de reciclabilidad, en Chile se podrían tener la siguiente generación de residuos que entran a tratamiento por reciclaje según si fuera HVR o LVR, en donde en el año 2046 nuevamente se observan los mayores volúmenes.

Figura 6: Generación de residuos de módulos fotovoltaicos por tipo de reciclaje al que ingresarían.



Tales tipos de tratamiento de módulos fotovoltaicos podrían generar beneficios para el país, en donde los más evidentes son los ambientales. No obstante, también podrían existir beneficios económicos producto de la valorización de las componentes de módulos fotovoltaicos recicladas y asimismo la creación de una nueva industria que podría generar diversos empleos. En vista de algunas estimaciones realizadas en base a información existente, se podrían tener beneficios económicos mayores a 100,000 UF y más de 900 nuevos empleos.

Tabla 4: Beneficios económicos y creación de empleo por tipo de reciclaje de módulos fotovoltaicos en Chile.

TIPO DE RECICLAJE	BENEFICIO (UF)	CREACIÓN DE EMPLEO (N°)
HVR	754,780	6,700
LVR	106,351	944

7 Conclusiones

El tratamiento de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil es un tema que ha surgido con más fuerza en los últimos años producto de la creciente penetración que ha tenido tal medio de generación eléctrica en el mundo. En consecuencia, existen muchos temas que se encuentran en desarrollo conforme los países avanzan en asuntos regulatorios, las tecnologías de módulos fotovoltaicos se desarrollan y las alternativas de tratamiento van sufriendo cambios y mejoras.

Es por lo que la estrategia de Chile de anticiparse a la aparición de grandes volúmenes de módulos fotovoltaicos que lleguen al fin de su vida útil es acertada y permite enfrentar la temática en un lapso razonable de tiempo. No obstante, por medio del presente estudio se detectaron diversos desafíos que se deben abordar y que en algunos casos no son exclusivos de nuestro país:

- Creación y actualización de una base de datos de módulos fotovoltaicos y sus características técnicas.
- Exigencia de certificación de la reciclabilidad de las componentes de los módulos fotovoltaicos comercializados.
- Definición y homologación de la vida útil efectiva (fin de funcionamiento) de los módulos fotovoltaicos.
- Definición del impacto ambiental de las componentes de módulos fotovoltaicos.
- Definición de procedimientos para la recolección, transporte y almacenamiento de los residuos de módulos fotovoltaicos en Chile.
- Implementación de la Ley 20.920 para el caso de módulos fotovoltaicos en Chile.

Asimismo, el tratamiento de módulos fotovoltaicos en el mundo se está abordando con una perspectiva en diversos horizontes de tiempo, en cuanto a: fase de preparación (corto plazo), fase de tratamiento de bajos volúmenes de residuos de módulos fotovoltaicos (mediano plazo) y fase de tratamiento de grandes volúmenes de residuos de módulos fotovoltaicos (largo plazo).