

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**GESTIÓN DE RESIDUOS DE PANELES SOLARES EN CHILE:  
DESAFÍOS AMBIENTALES Y ROL DE LAS POLÍTICAS  
PÚBLICAS EN EL FOMENTO DEL RECICLAJE SUSTENTABLE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERIA CIVIL  
INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**ARIEL LEANDRO TORO MUÑOZ**

**PROFESOR GUÍA**

**MARIA PILAR GARATE CHATEAU**

**SANTIAGO DE CHILE, 23 DE OCTUBRE DE 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** GESTIÓN DE RESIDUOS DE PANELES SOLARES EN CHILE: DESAFÍOS AMBIENTALES Y ROL DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN EL FOMENTO DEL RECICLAJE SUSTENTABLE

**Nombre del candidato(a):** Ariel Leandro Toro Muñoz

**Carrera / Grado:** INGENIERIA CIVIL INDUSTRIAL

**Campus:** VITACURA

**Departamento:** INDUSTRIAS

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **María Pilar Garate Chateau**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 23/10/2025

**Firma:** 

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 23/10/2025

**Firma:** 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **Agradecimientos**

A mi familia, por su amor incondicional y por acompañarme en estos años que han sido los más desafiantes de mi vida. Este trabajo es también fruto de su paciencia y comprensión, pues muchas veces sacrifiqué valiosos momentos familiares, en especial con mis hijos, para dedicarme a este proceso. Cada esfuerzo y cada renuncia cobran sentido gracias a su apoyo, que me dio la fuerza necesaria para continuar y culminar este camino.

## Resumen ejecutivo

El crecimiento acelerado de la capacidad solar en Chile, que a 2024 supera los 10 GW y seguirá aumentando hacia 2030, anticipa una ola significativa de residuos fotovoltaicos en las próximas dos décadas. Estos residuos presentan un volumen considerable, vida útil prolongada, presencia de materiales peligrosos y un alto potencial de valorización. La incorporación de los paneles fotovoltaicos en la Ley N.º 20.920, mediante la Resolución Exenta N.º 3.413/2025, constituye un hito regulatorio al reconocer este flujo emergente y establecer obligaciones específicas de gestión.

A nivel nacional, persisten vacíos relevantes: ausencia de normas técnicas de tratamiento, falta de criterios de clasificación por peligrosidad, escasez de infraestructura de reciclaje y un bajo nivel de conocimiento ciudadano sobre las políticas y el reciclaje de PFV. Estas brechas limitan la eficacia del sistema REP y requieren respuestas integrales.

El análisis comparado con experiencias internacionales en Europa (Alemania y Francia) y Asia (Japón) confirma que Chile debe avanzar hacia un modelo híbrido que combine trazabilidad efectiva, financiamiento sostenible e impulso a la innovación tecnológica, adaptando estas prácticas a su contexto. Asimismo, se identifican oportunidades para desarrollar modelos de negocio circulares en logística inversa, recertificación y valorización de materiales estratégicos.

El estudio reconoce limitaciones asociadas a la falta de datos nacionales, la incertidumbre regulatoria y la ausencia de un análisis económico detallado de los modelos propuestos. Estas limitaciones orientan futuras investigaciones hacia la generación de información local, estudios de factibilidad, validación tecnológica y evaluación de la percepción social.

En conclusión, la gestión de residuos fotovoltaicos debe asumirse como parte esencial de la transición energética hacia 2050. Solo con un marco regulatorio sólido, financiamiento adecuado, infraestructura especializada y participación social será posible transformar este desafío en una oportunidad para el desarrollo sustentable del país.

# Índice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS.....</b>   | <b>12</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GENERAL.....   | 12        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 12        |
| <b>3</b> | <b>GLOSARIO DE DEFINICIONES Y ABREVIATURAS .....</b>                                | <b>14</b> |
| 3.1      | DEFINICIONES .....  | 14        |
| 3.2      | ABREVIATURAS.....   | 16        |
| <b>4</b> | <b>MARCO TEÓRICO .....</b>  | <b>18</b> |
| 4.1      | ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: TECNOLOGÍA, RESIDUOS E IMPACTO AMBIENTAL.....           | 18        |
| 4.1.1    | <i>Principio de funcionamiento de la energía solar fotovoltaica.....</i>            | <i>18</i> |
| 4.1.2    | <i>Tipos de silicio utilizados en la fabricación de paneles fotovoltaicos .....</i> | <i>20</i> |
| 4.1.3    | <i>Componentes y módulos de paneles fotovoltaicos.....</i>                          | <i>21</i> |
| 4.1.4    | <i>Fin de la vida útil (FVU) de los paneles fotovoltaicos .....</i>                 | <i>25</i> |
| 4.1.5    | <i>Impacto ambiental.....</i>   | <i>27</i> |
| 4.1.6    | <i>Importancia de los polímeros en la vida útil y en el impacto ambiental .....</i> | <i>29</i> |
| 4.2      | EVALUACIÓN DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN CHILE.....                                | 31        |
| 4.2.1    | <i>Transición energética y energías renovables no convencionales en Chile .....</i> | <i>31</i> |
| 4.2.2    | <i>Próximos desafíos.....</i>   | <i>33</i> |
| 4.3      | ECONOMÍA CIRCULAR Y PROYECCIÓN DE RESIDUOS EN CHILE .....                           | 34        |
| 4.3.1    | <i>Residuos proyectados .....</i>   | <i>35</i> |
| 4.3.2    | <i>Tratamientos de residuos fotovoltaicos .....</i>                                 | <i>37</i> |
| <b>5</b> | <b>METODOLOGÍA .....</b>  | <b>40</b> |
| 5.1      | FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....   | 40        |
| 5.2      | CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE PAÍSES REFERENTES .....                                 | 41        |
| 5.3      | FUENTES DE LA INFORMACIÓN .....   | 41        |
| 5.4      | HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS .....  | 42        |
| <b>6</b> | <b>ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>   | <b>43</b> |
| 6.1      | MARCO NORMATIVO Y POLÍTICAS PÚBLICAS EN CHILE.....                                  | 43        |
| 6.1.1    | <i>Línea cronológica.....</i>   | <i>43</i> |
| 6.1.2    | <i>D.S. N.º 685/1992.....</i>   | <i>45</i> |
| 6.1.2.1  | <i>Conclusión FODA D.S. N.º 685/1992 .....</i>                                      | <i>45</i> |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6.1.3   | <i>D.S. N.º 148/2004</i> .....                                     | 46 |
| 6.1.3.1 | Conclusión FODA D.S. N.º 148/2004 .....                            | 47 |
| 6.1.4   | <i>D.S. N.º 38/2005</i> .....                                      | 47 |
| 6.1.4.1 | Conclusión FODA D.S. N.º 38/2005 .....                             | 48 |
| 6.1.5   | <i>Ley N.º 20.920</i> .....  | 49 |
| 6.1.5.1 | Conclusión FODA Ley N.º 20.920 .....                               | 51 |
| 6.1.6   | <i>D.S. N.º 8/2017</i> .....                                       | 51 |
| 6.1.6.1 | Conclusión FODA D.S. N.º 8/2017 .....                              | 52 |
| 6.2     | VACÍOS REGULATORIOS ACTUALES .....                                 | 53 |
| 6.3     | RESOLUCIÓN EXENTA N.º 310/2021 Y N.º 1.268/2023.....               | 55 |
| 6.4     | RESOLUCIÓN EXENTA N.º 3.413/2025 .....                             | 56 |
| 6.4.1   | <i>Conclusión FODA D.S. N.º 3.413/2025</i> .....                   | 59 |
| 6.4.2   | <i>Desafíos de implementación</i> .....                            | 61 |
| 6.4.2.1 | Desafíos técnicos e institucionales .....                          | 62 |
| 6.4.2.2 | Desafíos económicos.....   | 64 |
| 6.4.2.3 | Desafíos sociales.....   | 65 |
| 6.5     | VACÍOS REGULATORIOS ACTUALES V/S RESOLUCIÓN EXENTA N.º 3.413 ..... | 67 |
| 6.5.1   | <i>Escenario normativo ante nueva normativa</i> .....              | 67 |
| 6.6     | ANÁLISIS COMPARATIVO INTERNACIONAL.....                            | 70 |
| 6.6.1   | <i>Alemania</i> .....  | 72 |
| 6.6.1.1 | Ley de Economía Circular (KrWG) .....                              | 72 |
| 6.6.1.2 | Ley de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (ElektroG).....          | 75 |
| 6.6.1.3 | Reglamento técnico EAG-BehandV .....                               | 79 |
| 6.6.2   | <i>Francia</i> .....   | 82 |
| 6.6.2.1 | Principio de Responsabilidad Ampliada del Productor (REP) .....    | 82 |
| 6.6.2.2 | Inclusión de los paneles fotovoltaicos (PFV) en la REP .....       | 83 |
| 6.6.2.3 | Metas de recogida y reciclaje .....                                | 84 |
| 6.6.2.4 | Ecodiseño y sustancias peligrosas .....                            | 84 |
| 6.6.2.5 | Trazabilidad .....   | 85 |
| 6.6.2.6 | Financiamiento.....  | 85 |
| 6.6.2.7 | Régimen sancionatorio.....   | 86 |
| 6.6.2.8 | Eco-organismo SOREN .....  | 86 |
| 6.6.3   | <i>Japón</i> .....   | 87 |
| 6.6.3.1 | Alcances del marco normativo .....                                 | 88 |
| 6.6.3.2 | El papel de NEDO.....  | 89 |
| 6.6.3.3 | Financiamiento.....  | 89 |
| 6.6.3.4 | Metas.....   | 91 |
| 6.6.3.5 | Trazabilidad .....   | 91 |
| 6.6.3.6 | Estudios tecnológicos.....   | 92 |
| 6.6.3.7 | Articulación entre instituciones.....                              | 94 |
| 6.6.3.8 | Inversión público-privada .....                                    | 96 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.6.4    | <i>Benchmarking internacional</i> .....  | 97         |
| 6.6.4.1  | Conclusiones Benchmarking.....   | 98         |
| 6.6.4.2  | Recomendaciones de mejora frente a un nuevo D.S. referente a la R.E N.°3.413 ..... | 99         |
| 6.7      | MODELOS DE NEGOCIO ANTE LA INCORPORACIÓN DE LOS PFV A LA LEY REP.....              | 103        |
| 6.7.1    | <i>Descripción de modelos de negocios</i> .....                                    | 103        |
| 6.7.2    | <i>Modelo de Negocio de “Segunda Vida” de PFV</i> .....                            | 105        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSIONES</b> .....  | <b>108</b> |
| 7.1      | LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....  | 111        |
| 7.2      | PROYECCIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES .....                                    | 112        |
| <b>8</b> | <b>REFERENCIAS</b> .....   | <b>114</b> |
| <b>9</b> | <b>ANEXOS</b> .....  | <b>120</b> |
| 9.1      | ANÁLISIS FODA DEL D.S. N.° 685/1992 .....  | 120        |
| 9.2      | ANÁLISIS FODA DEL D.S. N.° 148/2004 .....  | 121        |
| 9.3      | ANÁLISIS FODA DEL D.S. N.° 38/2005 .....   | 122        |
| 9.4      | ANÁLISIS FODA DE LA LEY N.° 20.920 .....   | 123        |
| 9.5      | ANÁLISIS FODA DEL D.S. N.° 8/2017 .....  | 124        |
| 9.6      | ANÁLISIS FODA DEL R.E. N.° 3.413/2025 .....  | 126        |
| 9.7      | TABLA DE BENCHMARKING COMPARATIVO .....  | 128        |
| 9.8      | TABLA DE OPORTUNIDADES DE NEGOCIO .....  | 132        |
| 9.9      | TABLA DE POSIBLES USOS EN SEGUNDA VIDA PARA PANELES FOTOVOLTAICOS .....            | 134        |
| 9.10     | TABLA DE BARRERAS DE REUTILIZACIÓN DE LOS PVF .....                                | 135        |
| 9.11     | ANÁLISIS FODA DE MODELO DE NEGOCIO DE SEGUNDA VIDA PARA PFV .....                  | 136        |

## Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| TABLA 1: COMPOSICIÓN TÍPICA DE MATERIALES EN UN PANEL FOTOVOLTAICO UNIFACIAL BASADO EN SILICIO, MONO Y POLICRISTALINO ..... | 22  |
| TABLA 2: COMPOSICIÓN TÍPICA DE MATERIALES EN UN PANEL FOTOVOLTAICO BIFACIAL BASADO EN SILICIO, MONO Y POLICRISTALINO.....   | 23  |
| TABLA 3: CONTENIDO EN PESO APROXIMADO DE COMPONENTES, PARA PANELES CAPA FINA CdTe .....                                     | 24  |
| TABLA 4: VIDA ÚTIL DECLARADA POR PROVEEDORES DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....  | 26  |
| TABLA 5: CAPACIDAD INSTALADA MARZO DE 2025 .....  | 33  |
| TABLA 6: PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS (2042-2050) POR TIPO DE MATERIAL ACUMULADO (TON)...                           | 36  |
| TABLA 7: CRONOLOGÍA DE POLÍTICAS PÚBLICAS RELACIONADAS A PANELES FOTOVOLTAICOS.....   | 43  |
| TABLA 8: METAS DE RECOLECCIÓN. ....   | 58  |
| TABLA 9: CANTIDAD ACUMULADA DE INSTALACIONES ADICIONALES DE PRETRATAMIENTO.....   | 62  |
| TABLA 10: INSTALACIONES DE RECEPCIÓN NECESARIAS PARA CUMPLIR CON LA REGULACIÓN. ....  | 62  |
| TABLA 11: TABLA RESUMEN DE VACÍOS REGULATORIOS ACTUALES V/S RESOLUCIÓN EXENTA N.º3.413.....                                 | 67  |
| TABLA 12: MODELOS DE NEGOCIO EXISTENTES.....  | 104 |

## Índice de figuras

|   |     |
|---|-----|
| FIG. 1: EFECTO FOTOELÉCTRICO (MINISTERIO DE ENERGÍA, 2025) .....  | 18  |
| FIG. 2: SEMICONDUCTORES DOPADOS (LAMIGUEIRO, 2023). .....   | 19  |
| FIG. 3: TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS MÁS COMUNES (I-VERT ENERGY, 2023). .....   | 21  |
| FIG. 4: MÓDULO SOLAR UNIFACIAL (I-VERT ENERGY, 2023). .....   | 22  |
| FIG. 5: COMPOSICIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO BIFACIAL BASADO EN SILICIO (IN-DATA & RIGK, 2020A). ....   | 23  |
| FIG. 6: COMPOSICIÓN DE UN PANEL SOLAR DE CAPA FINA (IN-DATA & RIGK, 2020A). .....   | 24  |
| FIG. 7: TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN EL TIEMPO (ELABORACIÓN PROPIA). .....  | 32  |
| FIG. 8: PARTICIPACIÓN ERNC EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA MARZO-25 (ASOCIACIÓN CHILENA DE ENERGÍAS<br>RENOVABLES Y ALMACENAMIENTO [ACERA], 2025). .....  | 32  |
| FIG. 9: NÚMERO DE MÓDULOS FV ANUALMENTE DISPONIBLE PARA EL RECICLAJE EN CHILE (IN-DATA & RIGK,<br>2020B). .....   | 36  |
| FIG. 10: PROCESOS DE DESECHOS FOTOVOLTAICOS (ELABORACIÓN PROPIA, SEGÚN [TAO ET AL., 2020]). .....   | 39  |
| FIG. 11: FASES DE LA INVESTIGACIÓN. ....  | 40  |
| FIG. 12: CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO PRIORITARIO PILAS Y APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS<br>(DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA AMBIENTAL, 2025). .....   | 57  |
| FIG. 13: RESULTADO ENCUESTA: ¿QUÉ TAN INFORMADO SE ENCUENTRA SOBRE LA LEY DE RESPONSABILIDAD<br>EXTENDIDA DEL PRODUCTOR (LEY REP O DE RECICLAJE) Y SUS OBJETIVOS? (INSTITUTO UNAB DE<br>POLÍTICAS PÚBLICAS, 2024). .....                                    | 66  |
| FIG. 14: RESULTADO ENCUESTA: ¿CUÁL ES SU OPINIÓN, RESPECTO A LAS ACCIONES DEL ESTADO PARA PROMOVER<br>LA INFORMACIÓN Y EDUCACIÓN CIUDADANA SOBRE EL RECICLAJE DE APARATOS ELÉCTRICOS Y<br>ELECTRÓNICOS? (INSTITUTO UNAB DE POLÍTICAS PÚBLICAS, 2024). ..... | 66  |
| FIG. 15: RANKING DE LOS TOP 20 PAÍSES CON MAYOR CAPACIDAD FOTOVOLTAICA INSTALADA (ELABORACIÓN<br>PROPIA, FUENTE DE DATOS IRENA, 2024). .....  | 71  |
| FIG. 16: OPORTUNIDADES DE NEGOCIO IDENTIFICADAS EN CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LOS PFV<br>(ELABORACIÓN PROPIA). .....   | 103 |
| FIG. 17: MODELO DE NEGOCIO CANVAS PARA SEGUNDA VIDA DE PFV (ELABORACIÓN PROPIA). .....  | 106 |

# 1 Problema de investigación

En los últimos 20 años, la matriz energética de Chile ha experimentado un cambio significativo, caracterizado por el ingreso y consolidación de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), que fueron promovidas por leyes como la “Ley ERNC” N°20.257 del año 2008 y la posterior Ley N°20.698 (Ley 20/25). A partir de estas leyes, el país comenzó a incorporar exigencias concretas de participación de energías limpias en la generación eléctrica, lo que permitió un rápido aumento de capacidad instalada y generación proveniente de fuentes como la solar y la eólica (Irrarázaval, 2019).

En el año 2015 se publicó la Política Energética de Largo Plazo “Energía 2050”, la cual fijó como meta que al menos el 70% de la generación eléctrica proviniera de fuentes renovables al año 2050. Esta visión promovió un enfoque sistémico que reconocía que “la energía es mucho más que un insumo clave. Su generación y uso representan en sí mismos oportunidades adicionales para promover cambios positivos en la calidad de vida de las personas” (Ministerio de Energía, 2015).

Por otro lado, el desarrollo acelerado de la energía solar deja en evidencia una nueva problemática, la acumulación de desechos fotovoltaicos. En un estudio realizado el 2022, proyecta que para el 2051 se acumularán más de 556 mil toneladas de residuos solares a nivel nacional, cuyo valor podría aumentar si se adopta el modelo de recambio anticipado de los paneles fotovoltaicos por razones económicas (Rosas, 2022). Esta carrera por la descarbonización plantea una contradicción, mientras se avanza hacia una matriz energética limpia, se generan nuevos tipos de residuos potencialmente peligrosos y poco regulados.

Según un estudio realizado en el año 2019, más de 225.000 toneladas de paneles solares ya están instaladas en el país, y muchos de ellos podrían alcanzar su vida útil en menos de 20 años. Además, se evidencia que los paneles presentan obsolescencia práctica de alrededor de 15 años, mucho antes de lo previsto por garantías comerciales. En este estudio se plantea que, para consolidar a la energía solar como una alternativa verdaderamente sustentable, es imprescindible avanzar hacia una industria nacional del reciclaje y reutilización, basada en evidencia científica y análisis de ciclo de vida. Además, identifica que los métodos térmicos y químicos son actualmente las opciones más viables para Chile en términos de impacto

ambiental, aunque estos implican un mayor costo económico en comparación con los métodos mecánicos. Así, se plantea una clara compensación entre eficiencia ambiental y viabilidad económica, lo que refuerza la necesidad de una política pública que incentive esta nueva industria y ayude a superar estas barreras de entrada (Romero, 2019). Esta situación evidencia la necesidad de un marco regulatorio robusto y adaptado a la realidad nacional, que permita gestionar estos residuos de forma efectiva y sustentable, integrando aspectos técnicos, económicos y sociales.

Frente a esta realidad, la legislación chilena aún se encuentra rezagada en comparación con países desarrollados. En el año 2016 se promulgó la Ley N°20.920, que introdujo el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) como herramienta clave para la gestión de residuos, excluyendo inicialmente a los paneles fotovoltaicos del decreto que establece metas de recolección y valorización para los aparatos eléctricos y electrónicos (Ley N.°20.920, 2016). Esta exclusión fue rectificada parcialmente con la Resolución Exenta N.°1.268 del 30 de noviembre de 2023, la cual inició el proceso de consulta pública para incorporar formalmente a los paneles dentro del régimen REP, reconociendo su potencial contaminante (Resolución Exenta N.° 1.268, 2023). Posteriormente, el 28 de mayo de 2025, el Ministerio del Medio Ambiente aprobó la propuesta de decreto contenida en la Resolución Exenta N.° 03413/2025, actualmente en trámite de revisión ante el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (CMS). Esta propuesta establece metas de recolección progresiva para paneles solares y obligaciones específicas para los productores, integrando principios de economía circular, trazabilidad y prevención. A pesar de estos avances, persisten dudas sobre su efectividad real, los mecanismos de fiscalización, la infraestructura disponible y las condiciones para su implementación efectiva (Resolución Exenta N.° 3.413, 2025).

Frente a la falta de políticas públicas nacionales, resulta imprescindible mirar modelos internacionales. Un ejemplo es Alemania, pionera en políticas de reciclaje y gestión de residuos electrónicos, que cuenta con la ley de aparatos eléctricos y electrónicos (Bundesministerium der Justiz, 2022), basada en la Directiva Europea WEEE. Esta establece obligaciones claras para fabricantes, importadores y gestores de residuos eléctricos y electrónicos, incluyendo explícitamente a los módulos fotovoltaicos desde 2015. Esta normativa contempla no solo metas de recolección y tratamiento, sino también requisitos de diseño ecológico y trazabilidad de los residuos (Bundesministerium der Justiz, 2022).

Bajo este contexto, surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es la magnitud e impacto ambiental de los residuos generados por paneles solares en Chile, y por qué su adecuada gestión representa un desafío emergente para el país? ¿Cómo se relaciona la transición energética chilena con la necesidad de fortalecer el marco normativo en torno a los residuos fotovoltaicos? ¿Cuáles son los principales alcances, limitaciones y desafíos de implementación que presenta el futuro Decreto Supremo derivado de la Resolución Exenta N.º 3.413/2025 en el marco de la política pública de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en Chile? ¿Qué elementos de las experiencias internacionales podrían adaptarse al contexto chileno para mejorar la regulación y fomentar una industria nacional de reciclaje bajo un enfoque de economía circular? ¿Cuáles son los principales desafíos técnicos, institucionales, económicos y sociales que enfrentará Chile en la implementación del futuro Decreto Supremo derivado de la Resolución Exenta N.º 3.413/2025, orientado a la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos?

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Analizar la gestión de residuos de paneles solares en Chile, considerando su impacto ambiental, el avance de la transición energética y el marco normativo vigente, con especial atención a la propuesta contenida en la Resolución Exenta N.º 3.413/2025, para evaluar su potencial efectividad como instrumento de política pública, identificar los desafíos asociados a su implementación en caso de ser publicada en el Diario Oficial, y proponer estrategias sustentables basadas en experiencias internacionales, en el marco de una economía circular.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar los residuos generados por los paneles solares al final de su vida útil e identificar su impacto ambiental, a partir de estudios técnicos y literatura especializada, para sustentar recomendaciones de políticas públicas orientadas al reciclaje de paneles solares.

Contextualizar la transición energética en Chile y su impacto en el desarrollo de la energía solar, analizando el marco normativo y las políticas públicas sobre gestión de residuos tecnológicos, con énfasis en la Ley REP y su aplicación a los paneles solares, para identificar vacíos y oportunidades que justifiquen la nueva Resolución Exenta N.º 3.413/2025.

Analizar el contenido y alcance de la Resolución Exenta N.º 3.413/2025, revisando sus metas, obligaciones y vínculos con la Ley REP y los principios de economía circular, para entender su potencial como herramienta de gestión de residuos fotovoltaicos.

Analizar políticas públicas internacionales sobre el reciclaje de paneles solares, identificando buenas prácticas y modelos replicables en Chile, para establecer brechas en la Resolución Exenta N.º 3.413/2025 y fortalecer futuras recomendaciones bajo un enfoque de economía circular.

Identificar los desafíos que puede enfrentar la implementación de la nueva normativa, analizando barreras técnicas, económicas, institucionales y de infraestructura, con el propósito de anticipar problemas y facilitar una aplicación efectiva.

Recomendar políticas públicas y estrategias sustentables para la gestión y reciclaje de paneles solares en Chile, integrando los hallazgos del análisis documental y comparativo, con el fin de contribuir al desarrollo de un marco regulatorio coherente con los principios de la economía circular.

## 3 Glosario de definiciones y abreviaturas

### 3.1 Definiciones

Con el propósito de otorgar claridad conceptual y uniformidad en el uso de términos a lo largo del documento, se presentan a continuación las principales definiciones relevantes para la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en el marco de la Ley REP:

- **Panel fotovoltaico (PFV):** Dispositivo compuesto por celdas solares que convierte la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.
- **Fin de Vida Útil (FVU):** Etapa en la cual un panel fotovoltaico deja de cumplir con los niveles de eficiencia o funcionalidad requeridos, determinando su ingreso a la categoría de residuo.
- **Economía circular:** Modelo de producción y consumo que busca prolongar la vida útil de los productos y materiales mediante la reducción, reutilización, reparación, reciclaje y valorización.
- **Responsabilidad Extendida del Productor (REP):** Principio de política ambiental establecido en la Ley 20.920, que obliga a los productores a organizar y financiar la gestión de los residuos de sus productos una vez que estos finalizan su vida útil.
- **Logística inversa:** Conjunto de procesos para recolectar, transportar y gestionar productos al final de su vida útil, con el objetivo de valorizarlos o disponerlos adecuadamente.
- **Productor:** Persona natural o jurídica que, con independencia de la técnica de venta utilizada, desarrolle alguna de las actividades señaladas en la ley respecto de productos prioritarios, ya sea fabricando, importando o comercializando bajo marca propia (Ley N.º20.920, 2016).
- **Consumidor:** Persona natural o jurídica que adquiere un producto prioritario para su propio uso, en el ejercicio de su actividad empresarial o para uso doméstico, quedando excluidos quienes lo adquieran con el propósito de ponerlo nuevamente en el mercado (Ley N.º20.920, 2016).
- **Residuos de AEE/P (Aparatos Eléctricos y Electrónicos Prioritarios):** Conjunto de equipos eléctricos y electrónicos, incluidos los paneles fotovoltaicos una vez que

cumplen su vida útil, que son desechados y se convierten en residuos sujetos a las metas de la Ley REP.

- **Recolección:** Acción de recoger residuos desde los lugares donde son generados o acopiados, hasta el sitio de almacenamiento, valorización o eliminación final autorizado (Ley N.º20.920, 2016).
- **Valorización:** Cualquier operación cuyo resultado sea aprovechar los residuos para cumplir una función útil mediante el reemplazo de otros materiales, o prepararlos para dicho fin, incluyendo el reciclaje y la generación de energía a partir de ellos (Ley N.º20.920, 2016).

## 3.2 Abreviaturas

|             |  |
|-------------|--|
| AC          | Corriente Alterna.   |
| ACERA       | Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento.  |
| AEE         | Aparatos Eléctricos y Electrónicos.  |
| AGIES       | Análisis General de Impacto Económico y Social.  |
| AGEC        | Loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (Francia).  |
| AIT         | Aparatos Intercambiadores de Temperatura.  |
| BGBI        | Bundesgesetzblatt (Diario Oficial Alemán).   |
| CdTe        | Teluro de Cadmio.  |
| CIGS        | Cobre, Indio, Galio y Selenio.   |
| CIS         | Cobre, Indio y Selenio.  |
| CMA         | Code de l'Environnement – Código del Medio Ambiente (Francia).   |
| CMS         | Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (Chile).  |
| COA         | Comité Operativo Ampliado (MMA, Chile).  |
| COPs        | Contaminantes Orgánicos Persistentes.  |
| DC          | Corriente Continua.  |
| DIA         | Declaración de Impacto Ambiental.  |
| D.S.        | Decreto Supremo (Chile).   |
| EAG-BehandV | Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung (Reglamento técnico alemán de tratamiento de RAEE, incluye PFV). |
| EEE         | Equipos Eléctricos y Electrónicos (uso UE/Francia).  |
| EIA         | Estudio de Impacto Ambiental.  |
| ElektroG    | Elektro- und Elektronikgerätegesetz (Ley alemana de AEE/RAEE, incluye PFV).  |
| ERNC        | Energías Renovables No Convencionales.   |
| EVA         | Etileno-Vinil-Acetato (encapsulante de módulos FV).  |
| FV          | Fotovoltaico.  |
| FVU         | Fin de Vida Útil.  |
| IRENA       | Agencia Internacional de Energías Renovables.  |
| JPEA        | Japan Photovoltaic Energy Association (Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica).                                     |
| KrWG        | Kreislaufwirtschaftsgesetz (Ley de Economía Circular, Alemania).   |
| LGSE        | Ley General de Servicios Eléctricos (Chile).   |
| MINSAL      | Ministerio de Salud (Chile).   |
| MINREL      | Ministerio de Relaciones Exteriores (Chile).   |
| MMA         | Ministerio del Medio Ambiente (Chile).   |
| NEDO        | New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japón).   |
| OCDE        | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.   |
| PFV         | Panel(es) Fotovoltaico(s).   |
| POE         | Polioléfina Elastomérica (encapsulante alternativo a EVA).   |
| R.E.        | Resolución Exenta (Chile).   |
| RAEE        | Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.  |
| REP         | Responsabilidad Extendida del Productor.   |
| RETC        | Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.  |
| SIDREP      | Sistema de Declaración y Seguimiento de Residuos Peligrosos (Chile).   |

|              |  |
|--------------|--|
| SOREN        | Eco-organismo francés autorizado para gestionar PFV.   |
| Stiftung EAR | Fundación alemana encargada del registro de productores de AEE/RAEE.                         |
| örE          | Entidades públicas municipales de gestión de residuos (Alemania).                            |
| RoHS         | Restriction of Hazardous Substances (Directiva europea 2011/65/UE, modificada por 2015/863). |
| WEEE         | Waste Electrical and Electronic Equipment (Directiva RAEE, Unión Europea).                   |

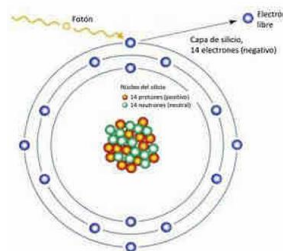
## 4 Marco Teórico

### 4.1 Energía solar fotovoltaica: Tecnología, residuos e impacto ambiental

Para comprender el problema planteado, es necesario entender el funcionamiento y la estructura de los paneles fotovoltaicos, así como los elementos que los componen. Para ello, resulta fundamental conocer cómo se genera esta forma de energía y cuáles son las etapas que conforman el proceso fotovoltaico.

#### 4.1.1 Principio de funcionamiento de la energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se produce gracias al efecto fotovoltaico, un fenómeno físico que permite la conversión directa de la luz solar en electricidad. Este proceso ocurre cuando los fotones de la luz solar inciden sobre un material semiconductor (como el silicio), excitando sus electrones y generando un flujo eléctrico (Ministerio de Energía, 2025), ver Fig. 1.



*Fig. 1: Efecto fotoeléctrico (Ministerio de Energía, 2025)*

Las etapas del proceso fotovoltaico son (Lamigueiro, 2023):

#### i. Absorción de la luz solar

Los paneles solares, formados por celdas fotovoltaicas, captan la radiación solar. La superficie de las celdas contiene una capa antirreflejo que maximiza la absorción de luz.

Las celdas son el núcleo de la tecnología y son fabricadas principalmente de silicio, un semiconductor que responde al impacto de la luz solar. Estas tienen una unión PN, donde:

- Capa tipo N: exceso de electrones.

- Capa tipo P: déficit de electrones.

Esta configuración genera un campo eléctrico interno (ver Fig. 2)

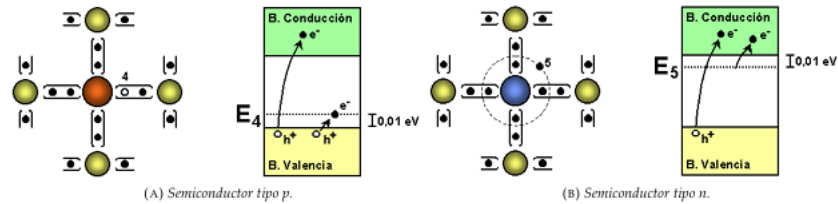


Fig. 2: Semiconductores dopados (Lamigueiro, 2023).

## ii. Excitación y liberación de electrones

Los fotones impactan el material semiconductor, liberando electrones desde sus átomos. El campo eléctrico interno dirige el movimiento de los electrones hacia un circuito externo, generando así una corriente eléctrica utilizable.

## iii. Generación de corriente continua (DC)

Los electrones liberados fluyen a través de un circuito externo, generando corriente continua.

Los electrodos metálicos conectados a la celda recogen la corriente generada. Esta puede ser almacenada, consumida localmente o inyectada a la red.

## iv. Conversión a corriente alterna (AC)

Un inversor convierte la corriente continua en corriente alterna, que es el tipo utilizado en hogares, industrias y la red eléctrica pública.

En resumen, el proceso fotovoltaico permite la conversión directa de la energía solar en electricidad mediante la acción del efecto fotoeléctrico en materiales semiconductores. Esta transformación, que inicia con la captación de la radiación solar y culmina en la entrega de corriente eléctrica utilizable, constituye la base funcional de los sistemas solares actuales. No obstante, la eficiencia, durabilidad y costo de estos sistemas dependen en gran medida del tipo de material semiconductor empleado. Por ello, a continuación, se analizan los distintos tipos de

silicio utilizados en la fabricación de paneles fotovoltaicos, destacando sus características, ventajas y aplicaciones más comunes en la industria solar.

#### **4.1.2 Tipos de silicio utilizados en la fabricación de paneles fotovoltaicos**

El silicio (Si) es el material semiconductor más utilizado en la fabricación de celdas fotovoltaicas, disponible en tres formas principales (In-Data & RIGK, 2020):

- Silicio monocristalino (Mono-Si): Tiene una única estructura cristalina, lograda mediante un crecimiento controlado, lo que le da una apariencia cilíndrica y color metálico uniforme.
- Silicio policristalino (Poli-Si): Formado por múltiples estructuras cristalinas, se obtiene sin control de cristalización, generando una coloración variable por la refracción de luz.
- Silicio amorfo (A-Si): No tiene estructura cristalina, lo que le otorga mayor flexibilidad para aplicaciones diversas.

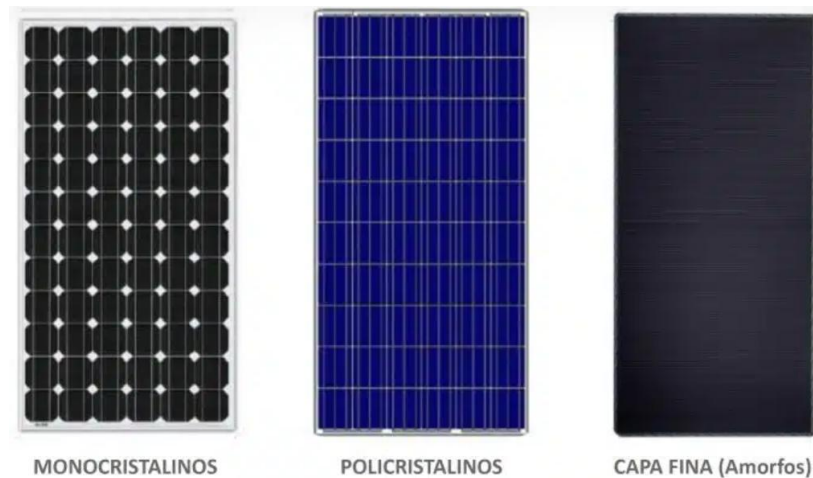
Además, existen otros materiales usados en celdas fotovoltaicas, especialmente en tecnologías de capa fina, como el telurio de cadmio (CdTe), y compuestos como CIGS (cobre, indio, galio y selenio), así como celdas orgánicas.

En base al tipo de silicio utilizado, en el mercado nacional podemos encontrar mayoritariamente tres tipos de paneles solares, los cuales son (In-Data & RIGK, 2020):

- Monocristalinos: tienen una eficiencia mayor que los policristalinos (en condiciones STC). Su rendimiento de laboratorio es cercano al 24%, y su rendimiento comercial oscila entre 17 y el 20%. Su vida útil también suele ser mayor que la de los paneles Policristalinos y generalmente se comportan mejor con radiación difusa.
- Policristalinos: tienen un rendimiento de laboratorio cercano al 19%, y su rendimiento comercial oscila entre 13 y el 15%. Por otro lado, tienen un mejor comportamiento a altas temperaturas, pudiendo generar más energía que el resto de los paneles bajo estas condiciones.
- De capa fina: Los paneles de capa fina generalmente tienen un rendimiento de laboratorio cercano al 13%, y su rendimiento comercial oscila entre 7 y el 9%. Su principal ventaja, es que a pesar de necesitar mayor espacio para generar la misma

energía que los paneles policristalinos o monocristalinos, su precio es mucho menor y muy atractivo (ver Fig. 3).

Los paneles de capa fina más importantes son los de capa fina de cobre, indio y selenio (CIS) o de cobre, indio, galio y selenio (CIGS) y por último los paneles de capa fina a base de cadmio y telurio (CdTe).



*Fig. 3: Tipos de paneles fotovoltaicos más comunes (I-Vert Energy, 2023).*

En definitiva, la elección del tipo de silicio, ya sea monocristalino, policristalino o capa fina, influye significativamente en el rendimiento, la eficiencia y el costo de los paneles fotovoltaicos, respondiendo a diferentes necesidades técnicas y económicas. Cada variante presenta ventajas particulares que han determinado su adopción en diversos contextos, desde aplicaciones residenciales hasta instalaciones a gran escala. Sin embargo, más allá del tipo de silicio, el desempeño global de un panel fotovoltaico también depende de la calidad y configuración de sus componentes estructurales y eléctricos. Por ello, a continuación, se describen los principales elementos que conforman los módulos fotovoltaicos y su composición.

### **4.1.3 Componentes y módulos de paneles fotovoltaicos**

Los módulos fotovoltaicos de silicio están compuestos por capas de distintos materiales dispuestas para optimizar la generación de electricidad. Las células solares se fabrican por separado y luego se ensamblan con otros componentes del panel. Este proceso da origen a dos

tipos de módulos de silicio, diferenciados principalmente por su materialidad y método de fabricación (In-Data & RIGK, 2020a).

## I. Módulos unificiales

Un módulo unifacial, es aquel que la recolección de energía proveniente de la luz solar. Solamente se realiza por una cara del módulo (ver Fig. 4).



Fig. 4: Módulo solar unifacial (I-Vert Energy, 2023).

Un módulo unifacial se compone, en términos generales, de los materiales y componentes que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico unifacial basado en silicio, mono y policristalino

| MATERIAL                       | CONTENIDO EN PESO (%) | PROPÓSITO  |
|--------------------------------|-----------------------|--|
| <b>SILICIO</b>                 | 2 – 3                 | Efecto fotovoltaico  |
| <b>VIDRIO</b>                  | 69 – 75               | Protección del módulo, permite paso de luz                   |
| <b>POLÍMEROS (EVA, TEDLAR)</b> | 7                     | Protección del módulo, encapsulamiento térmico               |
| <b>COBRE</b>                   | 0,6 – 1               | Conductor de la corriente                                    |
| <b>PLATA</b>                   | 0,006 – 0,06          | Conductor de la corriente                                    |
| <b>ALUMINIO</b>                | 10 – 20               | Estructura del panel, dopaje tipo “p” del silicio, conductor |
| <b>BORO</b>                    | < 0,1                 | Dopaje tipo “p” del silicio                                  |
| <b>FÓSFORO</b>                 | < 0,1                 | Dopaje tipo “n” del silicio                                  |
| <b>DIÓXIDO DE ESTAÑO</b>       | < 0,1                 | Recubrimiento antirreflectante                               |
| <b>PLOMO</b>                   | < 0,1                 | Recubrimiento del cobre                                      |
| <b>ESTAÑO</b>                  | < 0,1                 | Recubrimiento del cobre                                      |

Fuente: Tabla elaborada por In-Data & RIGK (In-Data & RIGK, 2020a).

## II. Módulos bifaciales

Los módulos bifaciales fueron desarrollados para aumentar la eficiencia energética por unidad de superficie, captando radiación solar por ambas caras. Pueden generar entre 10% y 30% más energía que los módulos unifaciales, dependiendo del tipo de superficie donde se instalan (ver Fig. 5).

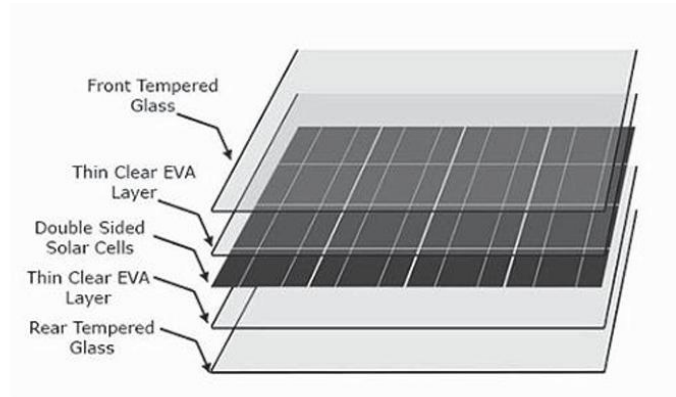


Fig. 5: Composición de un panel fotovoltaico bifacial basado en silicio (In-Data & RIGK, 2020a).

Un módulo bifacial se compone, en términos generales, de los materiales y componentes que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico bifacial basado en silicio, mono y policristalino

| MATERIAL                       | CONTENIDO EN PESO (%) | PROPÓSITO  |
|--------------------------------|-----------------------|--|
| <b>SILICIO</b>                 | 1,6                   | Efecto fotovoltaico  |
| <b>VIDRIO</b>                  | 86,8                  | Protección del módulo, permite paso de luz                   |
| <b>POLÍMEROS (EVA, TEDLAR)</b> | 2,9                   | Protección térmica del módulo                                |
| <b>COBRE</b>                   | 0,5                   | Conductor de la corriente                                    |
| <b>PLATA</b>                   | < 0,06                | Conductor de la corriente                                    |
| <b>ALUMINIO</b>                | 7,9                   | Estructura del panel, dopaje tipo “p” del silicio, conductor |
| <b>BORO</b>                    | < 0,1                 | Dopaje tipo “p” del silicio                                  |
| <b>FÓSFORO</b>                 | < 0,1                 | Dopaje tipo “n” del silicio                                  |
| <b>DIÓXIDO DE ESTAÑO</b>       | < 0,1                 | Recubrimiento antirreflectante                               |
| <b>PLOMO</b>                   | < 0,1                 | Recubrimiento del cobre                                      |
| <b>ESTAÑO</b>                  | < 0,1                 | Recubrimiento del cobre                                      |

Fuente: Tabla elaborada por In-Data & RIGK (In-Data & RIGK, 2020a).

### III. Módulos de capa fina

Los módulos de capa fina generan electricidad mediante el uso de materiales semiconductores tipo "n" y "p", al igual que los módulos de silicio, pero con la diferencia de que las células solares no se fabrican por separado, sino que están integradas directamente en el panel.

El proceso de fabricación se basa en la deposición de nanopartículas sobre un sustrato, formando capas de grosor nanométrico o micrométrico. Estos módulos suelen estar compuestos por materiales como telurio de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (ver Fig. 6).

Aunque comparten componentes como el vidrio y aluminio con los módulos de silicio, la cantidad de material semiconductor activo es mucho menor: cerca del 0,15% del peso total, es decir, aproximadamente 23 gramos en un panel de 15 kg.

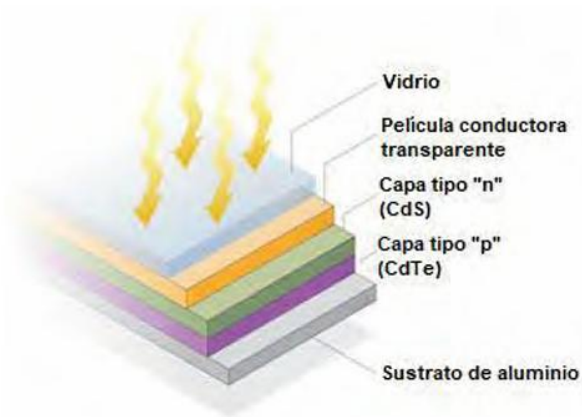


Fig. 6: Composición de un panel solar de capa fina (In-Data & RIGK, 2020a).

Un módulo de capa fina se compone, en términos generales, de los materiales y componentes que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Contenido en peso aproximado de componentes, para paneles capa fina CdTe

| MATERIAL                | CONTENIDO ESTIMADO | UNIDAD | OBSERVACIÓN                      |
|-------------------------|--------------------|--------|----------------------------------|
| VIDRIO                  | 32                 | kg     | Principal componente estructural |
| POLÍMEROS (EVA, TEDLAR) | S/I                | -      | No se indica                     |
| ALUMINIO                | 3.0                | kg     | Estructura del panel             |
| CADMIO                  | 1.68               | g      | Material semiconductor (CdTe)    |

|                |       |   |                               |
|----------------|-------|---|-------------------------------|
| <b>TELURIO</b> | 39.06 | g | Material semiconductor (CdTe) |
| <b>COBRE</b>   | S/I   | - | No se indica                  |
| <b>PLATA</b>   | S/I   | - | No se indica                  |
| <b>BORO</b>    | S/I   | - | No se indica                  |
| <b>PLOMO</b>   | S/I   | - | No se indica                  |
| <b>ESTAÑO</b>  | S/I   | - | No se indica                  |

*Fuente: Tabla elaborada por In-Data & RIGK (In-Data & RIGK, 2020a).*

En resumen, los módulos fotovoltaicos están compuestos por una serie de elementos que trabajan en conjunto para proteger el sistema, maximizar su rendimiento y garantizar su operación a lo largo del tiempo. La calidad y durabilidad de estos componentes son fundamentales para el desempeño y la vida útil del panel. No obstante, como todo dispositivo tecnológico, los paneles fotovoltaicos enfrentan un ciclo de vida limitado, tras el cual pierden eficiencia o quedan obsoletos. A continuación, se analiza el concepto de fin de vida útil de los paneles fotovoltaicos, sus principales causas y las implicancias que este fenómeno tiene en términos de gestión de residuos y sostenibilidad ambiental.

#### **4.1.4 Fin de la vida útil (FVU) de los paneles fotovoltaicos**

Tradicionalmente, el FVU de un módulo fotovoltaico se asociaba al momento en que el panel dejaba de funcionar o su eficiencia caía por debajo del 80%. Sin embargo, actualmente se adopta una visión más amplia que considera el FVU cuando el módulo ya no satisface las necesidades del usuario original, aunque aún funcione. Esta perspectiva permite implementar estrategias como la reutilización, reacondicionamiento y reciclaje.

##### **i. Fin de la vida útil según fabricantes**

Los productores de módulos FV no definen explícitamente su vida útil, pero sí establecen garantías estándar de 25 años sobre el rendimiento, asegurando un mínimo de 80% de la potencia nominal al finalizar este periodo.

Además, se ofrece una garantía contra desperfectos de fabricación de 10 años (15 en el caso de Canadian Solar).

Esto refleja un alto estándar de calidad en la industria, con una baja tasa de fallas declaradas (ver Tabla 4).

Tabla 4: Vida útil declarada por proveedores de paneles fotovoltaicos

| Productor                 | Garantía de rendimiento | Rendimiento al final | Garantía por fallas |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| <b>Trina Solar</b>        | 25 años                 | 80,7%                | 10 años             |
| <b>Jinko</b>              | 25 años                 | 80,2%                | 10 años             |
| <b>Yingli Solar</b>       | 25 años                 | 80,2%                | 10 años             |
| <b>Canadian Solar</b>     | 25 años                 | 83,1%                | 15 años             |
| <b>First Solar (CdTe)</b> | 25 años                 | 80%                  | 10 años             |

Fuente: Tabla elaborada por In-Data & RIGK (In-Data & RIGK, 2020).

Los módulos pueden continuar funcionando con buen rendimiento incluso después del período de garantía, superando el 80% de eficiencia.

## ii. Vida útil declarada en proyectos en Chile

En Chile, los proyectos fotovoltaicos deben declarar su vida útil en sus instrumentos de evaluación ambiental (DIA o EIA). No obstante, de 193 proyectos FV (Gran Escala, PMG, PMGD) al año 2020(In-Data & RIGK, 2020a):

- **14% de los módulos** no tienen declarada su vida útil.
- Entre los que sí lo hacen, **más del 50% declara una vida útil superior a 30 años**, algunos alcanzando incluso **40 o 45 años**.

Esto refleja una visión técnica y operativa más ambiciosa que la garantía estándar, anticipando que los módulos pueden ser utilizados eficientemente durante décadas más allá del período garantizado, en función de su rendimiento real y condiciones del sitio.

## iii. Vida útil financiera

La vida útil financiera de los proyectos fotovoltaicos en Chile, aunque no está declarada públicamente, suele estimarse entre 20 y 25 años, en línea con las garantías ofrecidas por los fabricantes. Esta estimación es utilizada por las empresas para evaluar la rentabilidad de las instalaciones, incluyendo la depreciación del activo fijo durante ese período.

En estas evaluaciones, se asume que los módulos no requieren mantenimientos mayores, lo que diferencia a esta tecnología de otras formas de generación eléctrica y permite reducir los costos operacionales proyectados. Además, se destaca que los proyectos FV suelen lograr su retorno de inversión en torno a los 10 años, aunque esto varía según factores como el precio de

venta de la energía, condiciones contractuales y niveles de radiación solar del sitio (In-Data & RIGK, 2020b).

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, la duración de los paneles fotovoltaicos puede variar considerablemente según el enfoque adoptado. Esta diversidad de criterios influye directamente en la generación de residuos, tanto en su volumen como en su temporalidad. Por ello, resulta fundamental comprender las implicancias ambientales asociadas a estos residuos, lo que se abordará en el siguiente apartado.

#### **4.1.5 Impacto ambiental**

Según lo expuesto en los puntos anteriores, los paneles fotovoltaicos están compuestos por diversos materiales y metales, por lo que, al desecharlos sin un previo tratamiento o reciclaje, podrían generar grandes impactos negativos al ambiente y para la salud.

En los paneles fotovoltaicos podemos encontrar los siguientes metales tóxicos:

- **Plomo (presentes en módulos de silicio):** El plomo es un metal tóxico acumulativo que puede afectar diversos sistemas del cuerpo, como el cardiovascular, neurológico, renal y digestivo. Los niños son especialmente vulnerables a sus efectos neurotóxicos, incluso a bajos niveles de exposición.

La exposición al plomo puede ocurrir en el trabajo o el entorno a través de la inhalación de partículas durante procesos como fundición, reciclaje o uso de combustibles con plomo, y mediante la ingestión de agua, alimentos o polvo contaminado, especialmente si se utilizan tuberías o envases con plomo (*Organización Panamericana de la Salud, 2025*).

El plomo representa aproximadamente un 0,1% del peso total de un módulo fotovoltaico (equivalente a entre 10 y 22 gramos por unidad). Bajo condiciones ácidas, se estima que entre un 13% y un 90% del plomo contenido puede filtrarse. Por lo tanto, en acumulaciones significativas, los desechos podrían contaminar las napas subterráneas y representar un riesgo para la salud humana (In-Data & RIGK, 2020b).

- **Cadmio (en módulos de capa fina CdTe):** El cadmio (Cd) es un metal tóxico y cancerígeno utilizado en diversas industrias, como la fabricación de baterías, pigmentos y procesos metalúrgicos. Se libera al medio ambiente principalmente como subproducto

de la producción de zinc, y su uso continuo ha contribuido a la contaminación de suelos, aguas y alimentos, especialmente en zonas agrícolas e industriales. El Cd tiene una vida media biológica de hasta 30 años y puede acumularse en el cuerpo humano, afectando principalmente a los riñones, el sistema respiratorio, el sistema nervioso central y los huesos. La exposición prolongada incluso a bajas dosis puede provocar enfermedades graves como cáncer, daño renal, trastornos neurológicos y enfermedades óseas. Además, atraviesa la placenta, afectando el desarrollo fetal. La revisión enfatiza la necesidad de controlar las fuentes de exposición y reducir su impacto ambiental y en la salud humana (National Library of Medicine, 2025).

El Cadmio se encuentra en módulos de capa fina en bajas cantidades, estimando 1,68 gramos por módulo aproximadamente, por lo que su desecho en altas concentraciones podría afectar la salud de las personas y el medio ambiente (In-Data & RIGK, 2020b).

- Encapsulado como Teluro de Cadmio (CdTe): El telururo de cadmio (CdTe), aunque eficiente para la generación fotovoltaica, plantea riesgos ambientales y para la salud debido a su contenido de cadmio, un metal altamente tóxico. Si bien el CdTe es químicamente más estable y menos tóxico que el cadmio metálico puro, su manipulación durante la fabricación, tratamiento térmico y disposición final puede liberar compuestos peligrosos. La degradación o daño de módulos CdTe, especialmente durante procesos de reciclaje inadecuados o exposición a incendios o condiciones extremas, podría liberar cadmio al ambiente, contaminando suelos y aguas subterráneas, y afectando organismos vivos.

A nivel de salud, la exposición prolongada al cadmio está asociada a enfermedades graves como cáncer, daño renal, enfermedades pulmonares crónicas, y trastornos neurológicos. Además, el uso de cobre (Cu) en los contactos posteriores, si no se controla adecuadamente, también puede contribuir a la degradación de los módulos y aumentar el riesgo de liberación de sustancias peligrosas (*Organización Panamericana de la Salud*, 2025).

Por otro lado, el desecho de paneles fotovoltaicos genera pérdidas de recursos valiosos y reciclables, tales como (In-Data & RIGK, 2020a):

- Vidrio:

- Componente principal (hasta el 89% en módulos de capa fina).
- 100% reciclable sin pérdida de calidad.
- Equivale aproximadamente 16 kg por módulo en promedio.
- Aluminio:
  - 8% a 11% del peso total (aprox. 2 – 3 kg por módulo).
  - También 100% reciclable con alto valor de recuperación.
- Plata:
  - Presente en pequeñas cantidades (aprox. 1 g por módulo de silicio).
  - Metal raro y valioso.
  - Solo se recupera cerca del 30% con tecnologías actuales.

Aunque muchos componentes de los módulos fotovoltaicos, como el vidrio y el aluminio, son altamente reciclables y valiosos, la mala disposición de materiales tóxicos como el plomo y el cadmio puede generar riesgos ambientales significativos. Además, la pérdida de metales raros como la plata representa un impacto económico y ambiental si no se desarrollan tecnologías más eficientes de recuperación.

Este análisis respalda la urgencia de implementar sistemas de gestión de residuos especializados y legislaciones como la Ley REP, que promuevan el reciclaje y valorización segura al final de la vida útil de los módulos.

En este contexto, el diseño de los módulos y la elección de materiales cobran un rol fundamental, no solo para reducir impactos desde el origen, sino también para facilitar su recuperación y reciclaje. En particular, los polímeros utilizados como encapsulantes desempeñan una función crítica en la durabilidad operativa y en las posibilidades de valorización al final del ciclo de vida, tal como se abordará en el siguiente apartado.

#### **4.1.6 Importancia de los polímeros en la vida útil y en el impacto ambiental**

En el contexto de una transición energética sustentable, el diseño y selección de materiales en los módulos fotovoltaicos cobra especial relevancia para prolongar su vida útil y facilitar su recuperación al final del ciclo de vida. En particular, los encapsulantes poliméricos,

que protegen las celdas solares del entorno (UV, humedad, oxígeno y temperatura), cumplen un rol crítico en la durabilidad operativa y en la posibilidad de aplicar estrategias de valorización y reciclaje.

El etileno-vinil-acetato (EVA) ha sido históricamente el material de encapsulación más utilizado por su bajo costo y compatibilidad industrial. Sin embargo, su degradación genera ácido acético, lo que favorece procesos corrosivos internos y complica la separación de componentes al final de vida, aumentando el impacto ambiental y dificultando el reciclaje. En contraste, los polímeros elastoméricos de poliolefina (POE) han demostrado una mejor resistencia a la degradación UV-humedad, no generan subproductos corrosivos, y presentan una estructura menos reticulada, lo que mejora su procesabilidad y reciclabilidad (Barretta, 2022).

Según el estudio de Barretta (2022), los módulos encapsulados con EVA instalados en climas tropicales presentaron pérdidas de potencia de entre 10% y 45% debido a la degradación del encapsulante y la corrosión de interconexiones, mientras que los POE mostraron mejor estabilidad y mayor compatibilidad con esquemas de recuperación de materiales (Barretta, 2022). Adicionalmente, el estudio concluyó que “El POE presentó una resistencia significativamente mayor a los mecanismos de degradación inducidos por UV y humedad combinada (UV-DH), siendo una alternativa viable para entornos exigentes” (Barretta, 2022), lo que lo hace aplicable al clima desértico de Chile.

En la actualidad, empresas fabricantes como JinkoSolar, LONGi y JA Solar ya integran POE en sus módulos premium, especialmente en módulos bifaciales. Además, se prevé una transición progresiva desde EVA a POE, alcanzando una participación de mercado del 30% en 2030 (Barretta, 2022).

Por lo tanto, los polímeros empleados en los módulos fotovoltaicos, especialmente los encapsulantes, tienen una influencia directa tanto en la vida útil del panel como en su impacto ambiental posterior. La elección entre materiales como el EVA o el POE no solo afecta la resistencia del módulo frente a condiciones ambientales exigentes, sino que también determina la facilidad con la que se pueden recuperar y reciclar sus componentes al término de su vida útil. Por tanto, incorporar criterios de sostenibilidad desde el diseño de materiales es clave para enfrentar los desafíos ambientales asociados a esta tecnología.

Finalmente, una vez caracterizados los paneles fotovoltaicos, su ciclo de vida y el impacto ambiental derivado de sus residuos, resulta necesario contextualizar esta problemática dentro del panorama energético nacional. Comprender cómo ha evolucionado la matriz energética de Chile, así como las políticas que han impulsado la expansión de las energías renovables, permite situar el desafío de los residuos solares en un marco más amplio. En este sentido, el siguiente capítulo evalúa los principales hitos de la transición energética en Chile, con énfasis en el desarrollo de la energía solar y sus implicancias futuras.

## **4.2 Evaluación de la transición energética en Chile**

La transición energética en Chile ha impulsado una transformación profunda en la matriz eléctrica, destacando el crecimiento sostenido de las energías renovables no convencionales. Este proceso no solo busca reducir las emisiones, sino también diversificar las fuentes de generación y fortalecer la seguridad energética. A continuación, se revisan los principales hitos y marcos normativos que han dado forma a este cambio estructural.

### **4.2.1 Transición energética y energías renovables no convencionales en Chile**

En la actualidad, el planeta atraviesa una compleja transición energética, orientada en la descarbonización de la economía como estrategia clave para mitigar los efectos del cambio climático. Para conseguirlo, se deben plantear objetivos capaces de compatibilizar los desafíos de corto plazo con la visión de largo plazo.

En Chile, nos encontramos en un segundo tiempo de transición energética, después de haber pasado por un primer tiempo, basado en la instalación de fuentes renovables (principalmente solar fotovoltaica y eólica) en el sistema eléctrico nacional, las cuales pasaron de ser tecnologías complementarias de las centrales convencionales a las principales tecnologías en generación (Ministerio de Energía, 2023).

En base a este contexto, es necesario identificar los principales hitos del primer tiempo de la transición energética nacional, los cuales se pueden observar en la línea de tiempo que se muestra en la Fig. 7, para poder entender los desafíos del segundo tiempo.

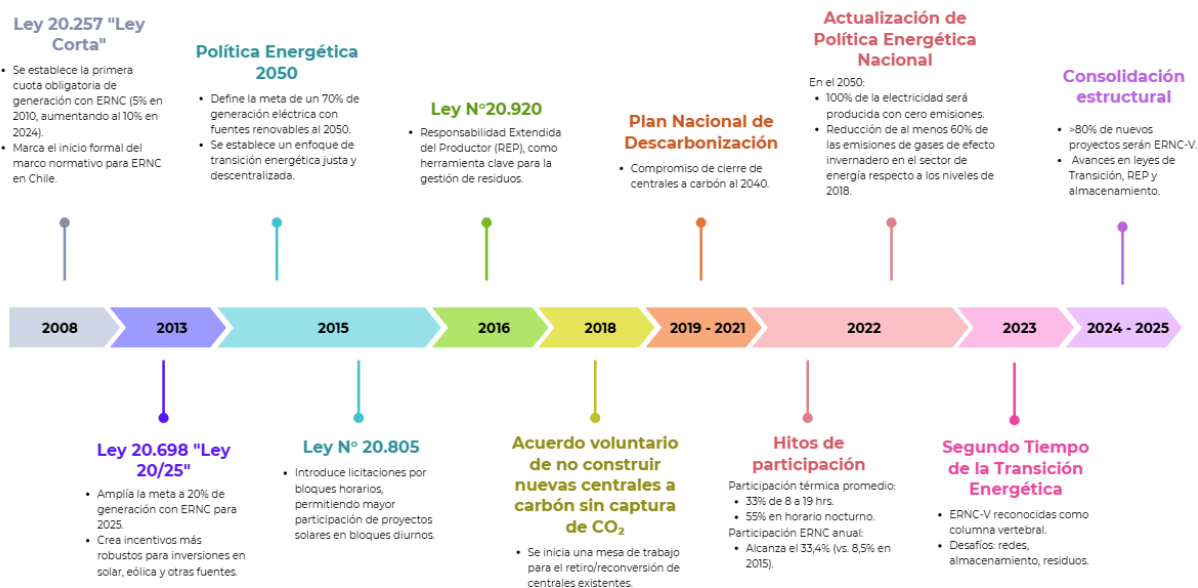


Fig. 7: Transición energética en el tiempo (elaboración propia).

En este contexto, la energía solar experimentó un crecimiento explosivo en su participación dentro del sistema eléctrico nacional, posicionándose como la fuente con mayor capacidad instalada a la fecha, alcanzando los 11.062 MW (ver Fig. 8 y Tabla 5).

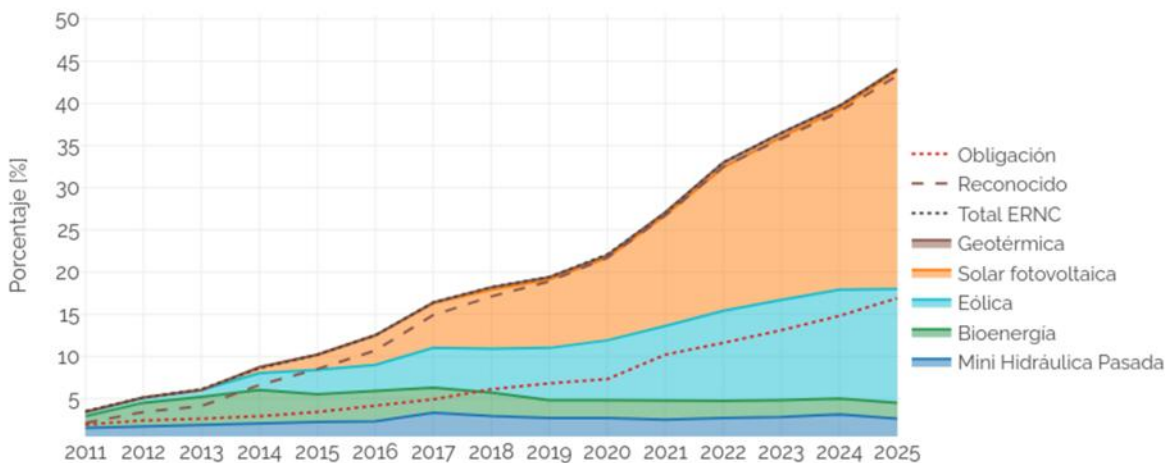


Fig. 8: Participación ERNC en la generación de energía Marzo-25 (Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento [ACERA], 2025).

Tabla 5: Capacidad instalada marzo de 2025

| Tecnología             | Tipo de Energía         | Potencia Neta [MW] | Potencia Neta [%] |
|------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| Biogás                 | ERNC                    | 60                 | 0,2%              |
| Biomasa                | ERNC                    | 463                | 1,3%              |
| Eólica                 | ERNC                    | 5.226              | 14,2%             |
| Geotérmica             | ERNC                    | 83                 | 0,2%              |
| Mini Hidráulica Pasada | ERNC                    | 659                | 1,8%              |
| Solar fotovoltaica     | ERNC                    | 11.062             | 30,0%             |
| Termosolar             | ERNC                    | 108                | 0,3%              |
| Hidráulica Embalse     | Hidráulica Convencional | 3.344              | 9,1%              |
| Hidráulica Pasada      | Hidráulica Convencional | 3.512              | 9,5%              |
| Carbón                 | Térmica                 | 3.499              | 9,5%              |
| Cogeneración           | Térmica                 | 20                 | 0,1%              |
| Fuel Oil Nro. 6        | Térmica                 | 134                | 0,4%              |
| Gas Natural            | Térmica                 | 4.862              | 13,2%             |
| Petróleo Diesel        | Térmica                 | 3.693              | 10,0%             |
| Propano                | Térmica                 | 14                 | 0,0%              |
| Petcoke                | Térmica                 | 21                 | 0,1%              |

Fuente: Considera Sistema Eléctrico Nacional, de Aysén, de Magallanes y de Isla de Pascua. Incluye centrales en operación y en pruebas (Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento [ACERA], 2025).

Este desarrollo fue impulsado por la reducción de costos tecnológicos, un marco normativo favorable y las metas de descarbonización nacional, tal como se plantea en la Política Energética al 2050 y los compromisos climáticos de Chile (Ministerio de Energía, 2022).

#### 4.2.2 Próximos desafíos

Chile se encuentra en una etapa de consolidación estructural que permitirá priorizar las acciones al 2030. Estas acciones tienen como propósito avanzar de manera coherente hacia el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Política Energética Nacional para el año 2050.

Esta etapa tiene como agenda inicial los siguientes puntos de interés (Ministerio de Energía, 2023):

##### I. Promoción del almacenamiento

- Reglamento de Coordinación y Operación del Sistema Eléctrico Nacional, y sistemas de almacenamiento.
- Asignación de terrenos fiscales para almacenamiento en subestaciones estratégicas para incrementar la colocación de energías renovables.
- Guía Técnica de evaluación ambiental para proyectos de almacenamiento.

## **II. Mitigación de riesgos a suministradores**

- Ajustes de sistema de compensación de impuestos verdes.
- Modernización de las licitaciones de suministro de clientes regulados.

## **III. Flexibilidad operacional**

- Revisión y ajuste de los mínimos técnicos de centrales térmicas.
- Modernización de la operación del Sistema Eléctrico Nacional.

## **IV. Acciones políticas, regulatorias y obras urgentes**

- Proyecto de Ley de Transición Energética que releva a la transmisión eléctrica como sector habilitante.
- Desarrollo de un Plan de Descarbonización.
- Open Season para el desarrollo de obras urgentes para el Sistema de Transmisión, conforme al artículo 102° de la LGSE.

Finalmente, Chile ha logrado avances significativos en la incorporación de energías renovables a su matriz energética, este desarrollo también plantea nuevos desafíos ambientales asociados al manejo de los residuos tecnológicos. En particular, el crecimiento acelerado de la energía solar fotovoltaica proyecta una acumulación creciente de residuos que, de no ser gestionados adecuadamente, podrían contradecir los objetivos de sostenibilidad perseguidos. En este contexto, el siguiente punto aborda el enfoque de economía circular como una estrategia clave para enfrentar esta problemática, junto con analizar las proyecciones de generación de residuos fotovoltaicos en el país.

### **4.3 Economía circular y proyección de residuos en Chile**

En el contexto de una transición hacia una matriz energética baja en emisiones, la expansión de energía renovables no debe ser la única preocupación de país, sino que también la forma en que se gestionarán sus residuos. Desde este punto de vista, la economía circular se convierte en un paradigma para el replanteamiento del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos, proponiendo mantener por mayor tiempo en uso sus materiales a través de la reutilización, reciclaje o reacondicionamiento.

Un enfoque circular, en el contexto de aceleración de energías renovables, permite anticipar soluciones a un problema emergente como lo es la acumulación creciente de residuos

fotovoltaicos al final de su vida útil. Estos residuos contienen materiales valiosos, como plata, silicio y aluminio, pero también, contiene materiales potencialmente tóxicos, como el plomo. Por ello, se vuelve prioritario desarrollar estrategias para la gestión de los residuos y establecer una disposición final ambientalmente segura.

Para dimensionar el impacto de los residuos y comprender la importancia de la economía circular, es necesario cuantificar los volúmenes proyectados de residuos fotovoltaicos en las próximas décadas, con el objeto de analizar las estrategias de gestión al final de la vida útil de los paneles solares.

#### **4.3.1 Residuos proyectados**

Como se ha visto en los puntos anteriores, el crecimiento acelerado de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Chile conlleva un aumento progresivo en la generación de residuos al final de su vida útil, por lo que la proyección de estos es fundamental para generar estrategias de gestión.

Según modelo desarrollado por Rosas Mayorga (2022), el que incorpora la vida útil técnica de los paneles fotovoltaicos y los recambios anticipados por razones económicas (en función de la reducción del costo nivelado de la energía), Chile podría acumular aproximadamente 556.100 toneladas de residuos fotovoltaicos hacia el año 2051. Cifra que se incrementaría a 983.208 toneladas acumuladas en 2070, evidenciando un volumen significativo de residuos (Rosas, 2022).

Complementariamente, el informe técnico encargado por el Ministerio de Energía y elaborado por In-Data y RIGK (2020) plantea dos escenarios basados en la vida útil de los módulos fotovoltaicos. El primer escenario asume una vida útil de 30 años, estimando que los residuos comenzaran a generarse en volúmenes significativos a partir del año 2042, alcanzando un peak de 170.561 toneladas en 2046, asociado al retiro de proyectos como Luz del Norte y Carrera Pinto. El segundo escenario plantea un acortamiento de la vida útil a 15 años, bajo un escenario financiero más agresivo, proyectando una anticipación del peak al año 2031, como resultado de recambios anticipados motivados por razones económicas (In-Data & RIGK, 2020b).

Además, este último, proyecta la generación de residuos por tipo de módulos y materiales, como se puede observar en la Fig. 9 y Tabla 6.

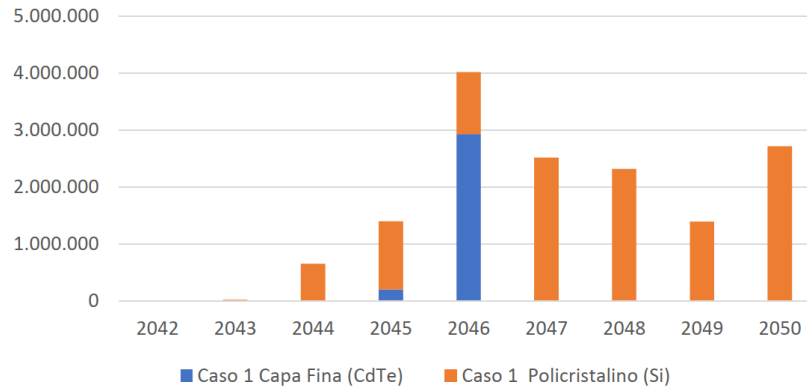


Fig. 9: Número de módulos FV anualmente disponible para el reciclaje en Chile (In-Data & RIGK, 2020b).

Tabla 6: Proyección de generación de residuos (2042-2050) por tipo de material acumulado (ton)

| MATERIALES                     | 2042       | 2043       | 2044          | 2045          | 2046           | 2047           | 2048           | 2049           | 2050           |
|--------------------------------|------------|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>VIDRIO</b>                  | 149        | 529        | 10.673        | 35.755        | 146.524        | 185.615        | 221.591        | 243.276        | 285.475        |
| <b>POLÍMEROS (EVA, TEDLAR)</b> | 15         | 55         | 1.102         | 3.017         | 4.757          | 8.792          | 12.506         | 14.744         | 19.100         |
| <b>ALUMINIO (AL)</b>           | 21         | 75         | 1.515         | 4.760         | 15.957         | 21.506         | 26.612         | 29.690         | 35.679         |
| <b>SILICIO (SI)</b>            | 4          | 15         | 308           | 845           | 1.332          | 2.462          | 3.502          | 4.128          | 5.348          |
| <b>COBRE (CU)</b>              | 1          | 5          | 93            | 327           | 1.530          | 1.869          | 2.180          | 2.368          | 2.734          |
| <b>PLATA (AG)</b>              | 0          | 0          | 1             | 2             | 4              | 7              | 10             | 12             | 16             |
| <b>BORO (B)</b>                | 0          | 1          | 15            | 42            | 67             | 123            | 175            | 206            | 267            |
| <b>FÓSFORO (P)</b>             | 0          | 1          | 15            | 42            | 67             | 123            | 175            | 206            | 267            |
| <b>ESTAÑO (SN)</b>             | 0          | 1          | 15            | 46            | 129            | 186            | 238            | 269            | 330            |
| <b>PLOMO (PB)</b>              | 0          | 1          | 15            | 42            | 67             | 123            | 175            | 206            | 267            |
| <b>CADMIO (CD)</b>             | 0          | 0          | 0             | 0             | 5              | 5              | 5              | 5              | 5              |
| <b>TELURIO (TE)</b>            | 0          | 0          | 0             | 8             | 123            | 123            | 123            | 123            | 123            |
| <b>TOTAL DE RESIDUOS (TON)</b> | <b>193</b> | <b>682</b> | <b>13.754</b> | <b>44.888</b> | <b>170.561</b> | <b>220.934</b> | <b>267.292</b> | <b>295.236</b> | <b>349.613</b> |

Fuente: Tabla elaborada por In-Data & RIGK (In-Data & RIGK, 2020b).

Ambos estudios coinciden en que la magnitud de los residuos aumentara rápidamente, y destacan que más del 95% del peso de los módulos proviene de materiales valorizables como el vidrio y aluminio. Sin embargo, también se identifican componentes tóxicos como el plomo y cadmio, como se puede observar en la Tabla 6.

Estos datos demuestran que Chile enfrenta un desafío logístico y ambiental, el cual también representa una oportunidad para implementar un modelo de economía circular robusto,

centrado en la valorización de residuos, la extensión de la vida útil de los módulos y en la creación de empleos.

Para esto, es importante analizar las formas de tratar los residuos al final de la vida útil de los módulos fotovoltaicos, con el propósito de evaluar su factibilidad en Chile, según su complejidad y costos.

#### **4.3.2 Tratamientos de residuos fotovoltaicos**

Para profundizar en los tratamientos de residuos fotovoltaicos, es importante destacar que los potenciales motivos de generación de desechos se pueden clasificar en tres grandes categorías:

- **Motivos técnicos:** Degradación de rendimiento o daños físicos.
- **Motivos económicos:** Cuando la eficiencia de nuevos módulos permite generar más energía a menor costo. También puede ocurrir por incentivos o subsidios; o por costos de mantenimiento crecientes.
- **Motivos operacionales y estratégicos:** Por modernización tecnológica, por repotenciación del parque fotovoltaico o por fin de vida útil del proyecto (desconexión de la planta).

En la actualidad, debido a la ausencia de normativas que regulen este tipo de desechos, es muy probable que el destino final de los módulos fotovoltaicos sea considerado como residuo general, siendo desechados en vertederos, especialmente cuando el valor económico recuperable es inferior al costo del tratamiento.

Según la literatura, se puede generar una visión general de los posibles destinos y tratamientos de residuos solares. La publicación realizada por Meng Tao y sus colaboradores, clasifica el tratamiento de los residuos según el grado de complejidad, indicando que mientras más complejo es el proceso, más materias primas son obtenidas, pero mayor es su costo (Tao et al., 2020).

La publicación identifica los siguientes destinos y procesos que los desechos fotovoltaicos podrían tener (Tao et al., 2020):

- Vertedero: opción más rentable cuando no hay incentivos ni normativas que impulsen el tratamiento de los residuos.
- V Cycle & SEIA (procesos actuales): Solo recuperan materiales voluminosos como cobre (Cu), aluminio (Al) y vidrio mediante desmontaje mecánico y trituración. Bajo valor económico.
- Veolia (proceso industrial mejorado): Añade molienda y separación óptica para recuperar vidrio y silicio, aunque de baja calidad (ferro-silicio).
- Reutilización del panel: Consiste en limpieza, inspección y prueba de eficiencia. Es el más rentable y con menos procesamiento, pero depende de la condición del panel y mercado secundario.
- Extracción de componentes: Involucra desmontaje, pirólisis (para separar células del vidrio sin dañarlas) y test de eficiencia. Recupera vidrio solar y células funcionales.
- Extracción de materiales: Proceso más complejo. Requiere pirólisis, lixiviación química, electrólisis y ataque químico para recuperar metales valiosos (Ag, Pb, Sn) y silicio de alta pureza (solar-grade Si).

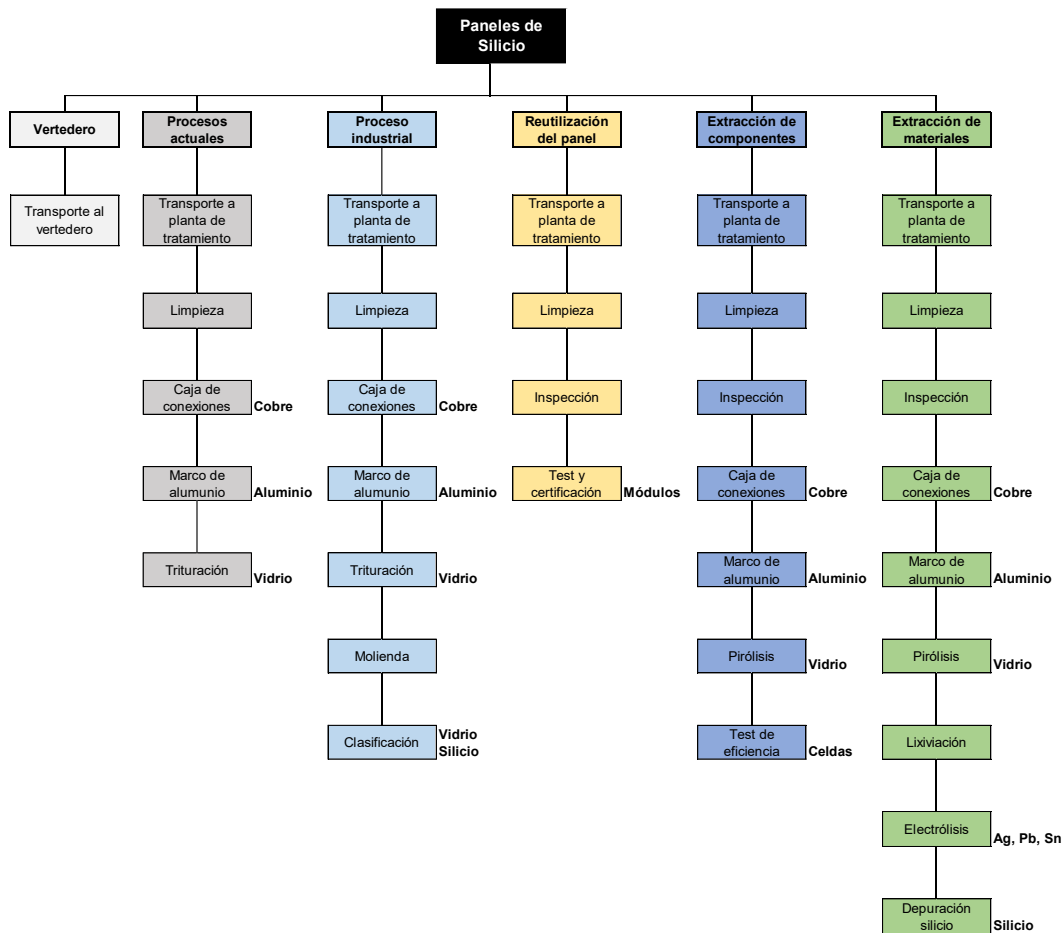


Fig. 10: Procesos de desechos fotovoltaicos (elaboración propia, según [Tao et al., 2020]).

Como se puede observar, existe una relación directa entre la complejidad del proceso y la cantidad de materiales recuperados. Los procesos más avanzados permiten extraer materias primas valiosas como silicio, plata (Ag) y plomo (Pb), también implican costos significativamente más altos en términos de tecnología, infraestructura y manejo de residuos peligrosos. Este aspecto resulta fundamental al momento de diseñar o evaluar políticas públicas, ya que la toma de decisiones debe considerar el balance entre los costos operacionales y los beneficios ambientales, económicos y sociales asociados al tratamiento de los residuos fotovoltaicos.

Finalmente, la proyección del aumento de residuos fotovoltaicos en Chile y la necesidad de implementar estrategias de economía circular exigen una revisión crítica del marco regulatorio vigente. La existencia de una legislación adecuada y de políticas públicas efectivas resulta fundamental para prevenir impactos ambientales, fomentar el reciclaje y promover una industria nacional de valorización.

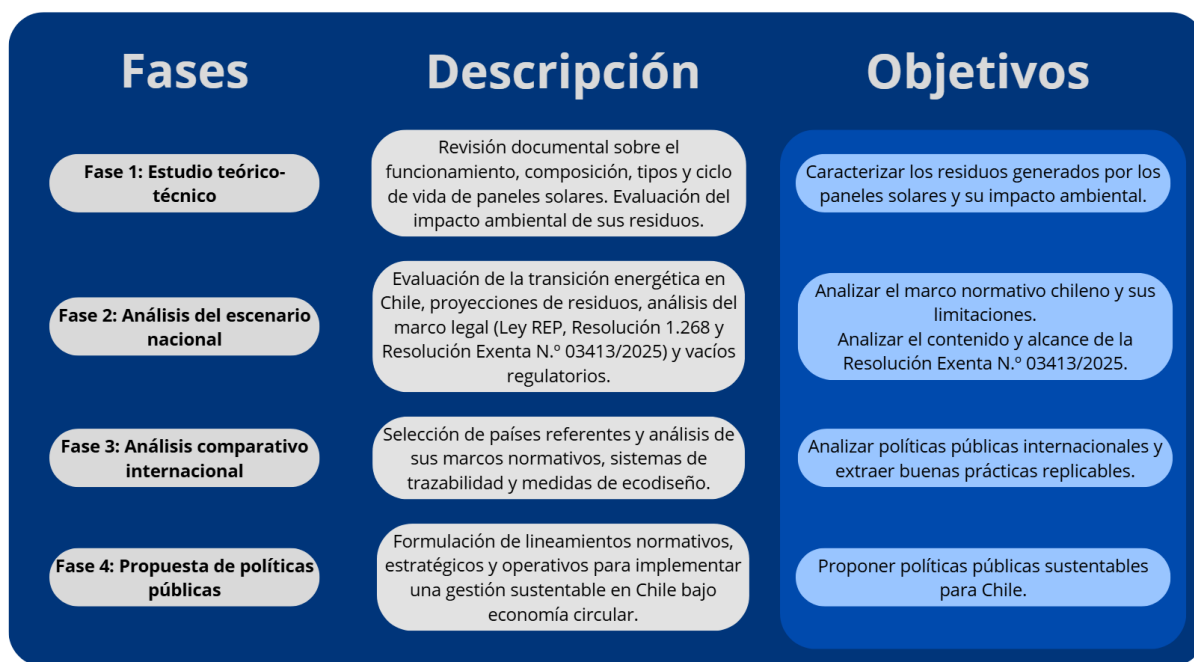
## 5 Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo de tipo exploratorio descriptivo, basándose en el análisis documental de fuentes secundarias, con la finalidad de caracterizar los residuos fotovoltaicos, contextualizar la transición energética en Chile y el estado actual de las políticas públicas sobre gestión de residuos tecnológicos.

Adicionalmente, se incluye un análisis comparativo con experiencias internacionales, con el objeto de formular recomendaciones de estrategias aplicables al contexto nacional, bajo un enfoque de economía circular.

### 5.1 Fases de la investigación

La investigación se estructura en cuatro fases metodológicas tal y como se observa en la Fig. 11.



*Fig. 11: Fases de la investigación*

Para realizar el análisis comparativo internacional, es necesario establecer previamente los criterios de selección de los países que actuarán como referentes. Estos criterios permitirán garantizar la pertinencia y relevancia de la comparación, asegurando que los marcos normativos

y las políticas públicas evaluadas sean aplicables o adaptables al contexto chileno. Los criterios utilizados para esta selección se detallan en el apartado siguiente.

## 5.2 Criterios para selección de países referentes

Para seleccionar los países con los cuales se realizarán las comparaciones, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Inclusión formal de los módulos fotovoltaicos dentro de su legislación de residuos eléctricos y electrónicos o mejores prácticas aplicadas.
- Aplicación de principios de economía circular.
- Innovación tecnológica.
- Accesibilidad a información oficial o académica documentada.

Estos criterios permitirán seleccionar los referentes internacionales más adecuados en función de los objetivos planteados en esta investigación. Para garantizar un análisis riguroso y coherente, resulta igualmente necesario definir las fuentes de información que serán utilizadas, las cuales permitirán recopilar antecedentes normativos, técnicos y estratégicos relevantes para la investigación.

## 5.3 Fuentes de la información

Las principales fuentes de información que se utilizarán en esta investigación son:

- **Primarias:** Legislación chilena vigente, marcos legales internacionales y planes energéticos nacionales.
- **Secundarias:** Tesis académicas, artículos científicos, informes técnicos y bases de datos de organismos públicos y privados.
- **Referenciales:** Estudios de caso de países líderes, publicaciones de organismos multilaterales y documentación de experiencias industriales.

Finalmente, para el desarrollo de la investigación, es fundamental definir las herramientas de análisis que permitirán procesar y estructurar la información recopilada. Estas herramientas facilitarán la comparación entre casos y la identificación de brechas, buenas

prácticas y oportunidades de mejora en el contexto chileno. Las metodologías seleccionadas se detallan en el siguiente apartado.

*Nota: Para apoyar la revisión de documentos en idiomas extranjeros se utilizaron herramientas de traducción asistida por inteligencia artificial, con el fin de complementar las traducciones oficiales y literatura secundaria disponible.*

#### **5.4 Herramientas de análisis**

Las herramientas seleccionadas para el procesamiento y análisis de la información recopilada son las siguientes:

- Matriz comparativa: permite comparar variables clave entre países en una tabla estructurada.
- FODA: analizar las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas del marco normativo chileno.
- Benchmarking normativo: identificar mejores prácticas regulatorias aplicadas en otros países que puedan ser adaptadas al contexto chileno.
- Modelo Canvas: este modelo permite estructurar de manera sistemática los elementos centrales de una propuesta de negocio a través de nueve bloques: propuesta de valor, segmentos de clientes, canales, relación con clientes, fuentes de ingreso, recursos clave, actividades clave, socios clave y estructura de costos.

## 6 Análisis y Resultados

### 6.1 Marco normativo y políticas públicas en Chile

El país ha avanzado significativamente en la incorporación de energía renovables no convencionales a su matriz energética, no así, las regulaciones de los residuos que estas pueden dejar. La adecuada gestión de residuos fotovoltaicos depende en gran medida del marco de políticas públicas para prevenir impactos ambientales y proteger la salud de las personas. Este apartado examina los instrumentos normativos vigentes, sus avances, vacíos y el rol del Estado en la construcción de una respuesta institucional coherente con los desafíos ambientales de las próximas décadas.

#### 6.1.1 Línea cronológica

La línea cronológica que se muestra en la Tabla 7 sintetiza los principales hitos normativos que han marcado la evolución de la gestión de residuos en Chile bajo la Ley REP, con especial atención a los paneles fotovoltaicos. Desde los convenios internacionales sobre sustancias peligrosas hasta la promulgación de la Ley N° 20.920 y las resoluciones exentas que dieron inicio al decreto de metas, se observa cómo los PFV pasaron de estar indirectamente considerados como residuos peligrosos a ser reconocidos como una subcategoría de los AEE en 2021 y, finalmente, a contar con metas de recolección y valorización definidas en 2025. Cabe señalar que estas últimas aún se encuentran en proceso de consolidación mediante un Decreto Supremo.

*Tabla 7: Cronología de políticas públicas relacionadas a paneles fotovoltaicos.*

| Año  | Norma / Instrumento                              | Contenido principal  | Relación con REP / PFV  |
|------|--|--|---|
| 1987 | Protocolo de Montreal (D.S. N° 238/1990, MINREL) | Sustancias agotadoras de la capa de ozono.   | Afecta AEE con refrigerantes.                                 |
| 1992 | Convenio de Basilea (D.S. N° 685/1992, MINREL)   | Movimientos transfronterizos de desechos peligrosos.   | Aplica a residuos peligrosos (incluye FV).                    |
| 2000 | DFL N° 1/19.653 (MINSEGPRES)                     | Texto refundido Ley Orgánica de la Administración del Estado.                                | Base administrativa.  |
| 2003 | D.S. N° 148/2003 (MINSAL)                        | Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.                                    | No incorpora a los PFV explícitamente.                        |
| 2005 | Convenio de Estocolmo (D.S. N° 38/2005, MINREL)  | Regula contaminantes orgánicos persistentes.   | Aplica a AEE con COPs.  |
| 2003 | Ley N° 19.880                                    | Bases de los Procedimientos Administrativos que rigen actos de la Administración del Estado. | Base procedimental para dictación de resoluciones y decretos. |

|      |   |  |   |
|------|---|--|---|
| 2016 | Ley N° 20.920                                   | Marco de gestión de residuos, REP y fomento al reciclaje.  | Ley REP – base legal de todo el proceso.                      |
| 2017 | D.S. N° 8/2017 (MMA)                            | Reglamento para elaboración de DS de la Ley REP.   | Define procedimiento para decretos de metas.                  |
| 2018 | Convenio de Minamata (D.S. N° 269/2018, MINREL) | Control sobre el mercurio.   | Relevante en pilas y ciertos AEE.                             |
| 2021 | Res. Ex. N° 310/2021 (MMA)                      | Termina proceso de pilas e inicia DS Pilas + AEE.  | Punto de partida para integrar PFV.                           |
| 2021 | Res. Ex. N° 524/2021 (MMA)                      | Convoca representantes al Comité Operativo Ampliado (COA).   | Comienza participación de actores.                            |
| 2021 | Res. Ex. N° 605/2021 (MMA)                      | Amplía plazo de postulación al COA.  | Ajuste procedimental.   |
| 2021 | Res. Ex. N° 675/2021 (MMA)                      | Designa integrantes del COA.   | Establece quién participa en elaboración del DS.              |
| 2021 | Res. Ex. N° 1229/2021 (MMA)                     | Amplía plazo de elaboración del anteproyecto.  | Extiende trabajo previo.                                      |
| 2021 | Res. Ex. N° 1518/2021 (MMA)                     | Amplía plazo de elaboración del anteproyecto.  | Extiende trabajo previo.                                      |
| 2022 | Res. Ex. N° 207/2022 (MMA)                      | Aprueba anteproyecto de DS Pilas + AEE.  | En esta etapa PFV aún estaban excluidos.                      |
| 2022 | Res. Ex. N° 402/2022 (MMA)                      | Amplía plazo de consulta pública del anteproyecto.   | Da más tiempo a revisión técnica y ciudadana.                 |
| 2022 | Res. Ex. N° 876/2022 (MMA)                      | Amplía plazo de elaboración de la propuesta DS.  | Extiende discusión sobre metas.                               |
| 2023 | Res. Ex. N° 104/2023 (MMA)                      | Amplía plazos de elaboración de la propuesta.  | Ajuste administrativo.  |
| 2023 | Res. Ex. N° 105/2023 (MMA)                      | Amplía plazos de elaboración de la propuesta.  | Ajuste administrativo.  |
| 2023 | Res. Ex. N° 3407/2023 (MMA)                     | Amplía plazos de elaboración de la propuesta.  | Ajuste administrativo.  |
| 2023 | Res. Ex. N° 5958/2023 (MMA)                     | Amplía plazos de elaboración de la propuesta.  | Ajuste administrativo.  |
| 2022 | Oficio ORD B32/N.º 2516/2022 (MINSAL)           | Declara que todos los paneles fotovoltaicos deben tratarse como residuos peligrosos salvo certificación en contrario, el oficio orienta a las SEREMI de Salud sobre cómo fiscalizar. | Interpreta el D.S. N.º 148/2003.                              |
| 2023 | Res. Ex. N° 1268/2023 (MMA)                     | Inicia período de información pública para paneles FV.   | Primer paso formal para incluir PFV como subcategoría de AEE. |
| 2023 | Res. Ex. N° 36/2024 (Contraloría)               | Fija normas sobre exención de toma de razón.   | Agiliza proceso normativo.                                    |
| 2024 | Res. Ex. N° 2924/2025 (MMA)                     | Amplía plazo de elaboración de la propuesta de DS.   | Última extensión antes de aprobación.                         |
| 2025 | Res. Ex. N° 3413/2025 (MMA)                     | Aprueba propuesta de D.S que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos.                             | Incluye a PFV y genera metas de recolección y valorización.   |

*Fuente: Elaboración propia.*

Sobre la base de la cronología de políticas públicas expuesta, se analizarán las principales leyes y decretos actualmente vigentes vinculados a la gestión de paneles fotovoltaicos, con el propósito de ofrecer una comprensión más profunda y sistemática del marco normativo nacional en esta materia. Cabe señalar que las Resoluciones Exentas no se incluyen en este punto, dado que aún no se han materializado en un Decreto Supremo.

### **6.1.2 D.S. N.º 685/1992**

El Decreto Supremo N.º 685 de 1992 del Ministerio de Relaciones Exteriores promulgó en Chile el Convenio de Basilea, cuyo objetivo es regular los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación ambientalmente racional. El tratado fue firmado por más de 170 países alrededor del mundo.

Este tratado obliga a los Estados Parte a (Decreto Supremo 685, 1992):

- Minimizar la generación de residuos peligrosos en origen.
- Gestionarlos dentro del propio país siempre que sea posible.
- Permitir exportación solo cuando el país carezca de capacidad técnica para tratarlos o cuando exista un destino de valorización.
- Exigir consentimiento previo por escrito del país importador y trazabilidad mediante un documento de movimiento.
- Asegurar que el transporte cumpla con normas internacionales de embalaje, etiquetado y seguridad.
- Contar con seguros o garantías financieras para cubrir riesgos.
- Tipificar como tráfico ilícito cualquier movimiento no autorizado o fraudulento, sancionándolo como delito.

Este Decreto Supremo no hace referencia explícita a los paneles fotovoltaicos, sin embargo, clasifica como desechos peligrosos aquellos que contienen metales y compuestos como plomo, cadmio y telurio (Decreto Supremo 685, 1992), presentes en la composición de los PFV. En virtud de ello, se ha realizado un análisis FODA de este decreto, con el propósito de identificar oportunidades de mejora respecto a su aplicación en la gestión de paneles fotovoltaicos.

#### **6.1.2.1 Conclusión FODA D.S. N.º 685/1992**

Según el análisis FODA (Anexo 9.1), el D.S. N.º 685/1992 constituye un instrumento internacional robusto que entrega a Chile un marco de acción relevante en materia de residuos peligrosos, al asegurar estándares mínimos de Manejo Ambientalmente Racional, trazabilidad en el comercio internacional y la persecución del tráfico ilícito. Estas fortalezas lo convierten

en un pilar de legitimidad para futuras regulaciones nacionales que busquen abordar los residuos de paneles fotovoltaicos.

Si bien el decreto no contempla explícitamente a los PFV, su cobertura sobre metales pesados presentes en estos equipos permite su inclusión indirecta bajo la categoría de residuos peligrosos. Este aspecto abre oportunidades para que Chile utilice al Convenio como base de justificación jurídica para establecer regulaciones más específicas a nivel interno.

Adicionalmente, las disposiciones del tratado sobre cooperación internacional y trazabilidad documental pueden servir como plataformas para impulsar el desarrollo de infraestructura nacional de reciclaje, aprovechar experiencias comparadas y fortalecer los mecanismos de control aduanero frente a posibles exportaciones irregulares.

En consecuencia, aunque el D.S. N.º 685/1992 no constituye por sí mismo una política directa para el reciclaje de paneles solares, sus fortalezas y oportunidades lo posicionan como un marco habilitante que respalda y legitima la acción del Estado chileno para avanzar hacia la valorización sustentable de los residuos fotovoltaicos.

### **6.1.3 D.S. N.º 148/2004**

El Decreto Supremo N.º 148, promulgado en 2003 por el Ministerio de Salud de Chile, aprueba el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. Este cuerpo normativo establece las condiciones mínimas de seguridad y sanidad para la generación, almacenamiento, transporte, tratamiento, reúso, reciclaje, disposición final y eliminación de residuos peligrosos, con el objetivo de proteger la salud de la población y el medio ambiente frente a los riesgos asociados a dichos residuos (Decreto Supremo 148, 2004).

El reglamento regula de manera detallada las obligaciones de generadores, transportistas e instalaciones de eliminación, exigiendo la elaboración de planes de manejo, la obtención de autorizaciones sanitarias, el cumplimiento de medidas de almacenamiento seguro, el uso de transporte especializado y la aplicación de tecnologías como la incineración o la disposición en rellenos de seguridad. Además, establece sistemas de declaración y seguimiento de residuos, sanciones para el incumplimiento y otorga a la Autoridad Sanitaria la facultad de fiscalizar (Decreto Supremo 148, 2004).

Si bien este decreto no hace referencia explícita a los paneles fotovoltaicos (PFV), sí regula los residuos peligrosos presentes en su composición, como el plomo y el cadmio. En este sentido, se configura como un marco legal relevante para el análisis, al establecer bases regulatorias que pueden sustentar en el futuro el manejo y reciclaje seguro de los residuos fotovoltaicos en Chile.

Con el propósito de profundizar en su alcance, se elaboró un análisis FODA, orientado a identificar las principales fortalezas y oportunidades que este decreto ofrece para su eventual aplicación en la gestión de residuos de PFV.

#### **6.1.3.1 Conclusión FODA D.S. N.º 148/2004**

Las conclusiones del análisis FODA (Anexo 9.2) del D.S. N.º 148/2004 muestran que este reglamento constituye un marco regulatorio robusto para la gestión de residuos peligrosos, aplicable a los paneles fotovoltaicos (PFV) debido a la presencia de metales como plomo y cadmio. Entre sus fortalezas destacan la exigencia de planes de manejo, la existencia de un sistema de declaración y trazabilidad (SIDREP) y los requisitos técnicos para almacenamiento y transporte, que reducen riesgos ambientales y sanitarios. Asimismo, las oportunidades identificadas apuntan al impulso indirecto del reciclaje especializado, el desarrollo de infraestructura nacional de tratamiento, la alineación con compromisos internacionales y la promoción de la economía circular mediante la recuperación de materiales valiosos de los PFV.

No obstante, el mismo FODA evidencia que este decreto no se ha aplicado directamente al reciclaje de paneles solares, debido a su carácter generalista y correctivo, más enfocado en la disposición segura que en la valorización. A ello se suma la ausencia de referencia explícita a los PFV, la dependencia de la infraestructura nacional aún incipiente y los costos asociados a la exportación de residuos. En la práctica, su rol se ha limitado a funcionar como un marco sanitario complementario, constituyéndose en un pilar de referencia y base regulatoria para el desarrollo de futuras normativas específicas sobre los residuos fotovoltaicos.

#### **6.1.4 D.S. N.º 38/2005**

El Decreto N.º 38 de 2005 promulga en Chile el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs). Este tratado internacional reconoce que ciertas

sustancias químicas (como dioxinas, furanos, bifenilos policlorados, pesticidas organoclorados, entre otros) son altamente tóxicas, persistentes en el ambiente, bioacumulables y pueden transportarse a grandes distancias, causando graves impactos en la salud humana y en los ecosistemas. El convenio establece obligaciones para los Estados Parte, entre ellas: prohibir o restringir la producción y uso de los COPs, asegurar la gestión ambientalmente racional de existencias y desechos, aplicar mejores técnicas disponibles para prevenir su generación, e informar periódicamente sobre el cumplimiento (Decreto Supremo 38, 2017).

Su importancia para el reciclaje de paneles fotovoltaicos (PFV) radica en que muchos de estos equipos, al transformarse en residuos, contienen sustancias peligrosas que podrían comportarse como COPs o generar compuestos tóxicos durante procesos inadecuados de manejo (por ejemplo, incineración abierta de plásticos o laminados). El Convenio de Estocolmo obliga a Chile a prevenir la liberación de estas sustancias, lo que se vincula directamente con la necesidad de implementar sistemas de reciclaje seguro para los PFV. En este contexto, la REP y los decretos específicos que incluyen a los paneles en las metas de recolección y valorización se alinean con las obligaciones internacionales, fortaleciendo la trazabilidad y el tratamiento ambientalmente racional de estos residuos.

Con el propósito de profundizar en su alcance, se elaboró un análisis FODA, orientado a identificar las principales fortalezas y oportunidades que este decreto ofrece para su eventual aplicación en la gestión de residuos de PFV.

#### **6.1.4.1 Conclusión FODA D.S. N.º 38/2005**

El análisis del Decreto 38/2005 (Anexo 9.3) muestra que, aunque no menciona de forma explícita a los paneles fotovoltaicos, constituye una base normativa sólida para el desarrollo de futuras leyes de reciclaje de estos equipos en Chile. En sus fortalezas destaca la clasificación de contaminantes peligrosos presentes en encapsulantes plásticos como el EVA o el PVC, así como la restricción de retardantes bromados y PCB en equipos eléctricos asociados. Estas disposiciones evidencian la necesidad de considerar los componentes de los PFV bajo un enfoque de residuos peligrosos, orientando la trazabilidad y la gestión ambientalmente racional en su ciclo de fin de vida.

Las oportunidades identificadas revelan el potencial del Convenio para facilitar la creación de un marco normativo específico en Chile, que no solo regule la recolección y valorización de paneles solares, sino que también incentive la investigación en encapsulantes sin halógenos, acceda a financiamiento internacional y fortalezca la educación ambiental en torno a la economía circular. De esta manera, futuras leyes podrán alinearse con estándares globales, garantizando un manejo seguro de materiales y la prevención de emisiones de COPs.

No obstante, las debilidades y amenazas advierten que la falta de mención explícita a los PFV en el Convenio genera vacíos regulatorios que deben ser abordados por normativas nacionales más específicas. Asimismo, los altos costos de gestión de residuos con COPs y la limitada infraestructura en Chile para el tratamiento de PCB y plásticos halogenados podrían ralentizar la implementación de dichas leyes. Finalmente, la acumulación de PFV sin tratamiento adecuado, junto con el riesgo de exportaciones ilegales o el uso de nuevos materiales aún no regulados, refuerzan la urgencia de una legislación que asegure control, trazabilidad y reciclaje seguro de estos equipos.

En síntesis, el FODA evidencia que el Decreto 38/2005, pese a su carácter general, ofrece un marco de referencia clave para fundamentar futuras leyes de reciclaje de PFV en Chile.

### **6.1.5 Ley N.º 20.920**

La Ley N.º 20.920 fue promulgada en junio de 2016, la cual establece el marco para la gestión de residuos, la “Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y Fomento al Reciclaje”, siendo la base legal para promover la economía circular en Chile. Su objetivo principal es “disminuir la generación de residuos y fomentar su valorización mediante la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión” (Ley N.º 20.920, 2016).

Según el Artículo 3, letra t, se establece que: “Responsabilidad Extendida del Productor: obligación de los productores de productos prioritarios de organizar y financiar la gestión de los residuos derivados de los productos que ellos introduzcan en el mercado nacional, con independencia de quién posea el residuo”, definiendo explícitamente la obligación de los

productores de productos prioritarios de organizar y financiar la recolección como el tratamiento de los residuos derivados de sus productos una vez que se ha terminado su vida útil.

Esta ley aplica inicialmente a seis productos prioritarios:

1. Aceites lubricantes.
2. Aparatos eléctricos y electrónicos.
3. Baterías.
4. Envases y embalajes.
5. Neumáticos.
6. Y pilas.

Observando que los paneles fotovoltaicos no fueron considerados directamente dentro de esta regulación.

Posteriormente, el primer decreto supremo que implemento la Ley N.º 20.920 fue el Decreto Supremo N.º 8/2021 del Ministerio del Medio Ambiente, el cual establece metas de recolección y valorización, así como otras obligaciones asociadas específicamente para los neumáticos (Decreto Supremo N.º 8, 2021), no considerando los paneles fotovoltaicos nuevamente.

En síntesis, si bien la Ley N.º 20.920 representa un hito fundamental en la promoción de la economía circular en Chile, estableciendo un marco legal robusto para la gestión de residuos y la responsabilidad extendida del productor, aún persisten vacíos importantes respecto a ciertos flujos emergentes como los paneles fotovoltaicos. La omisión de estos dentro de los productos prioritarios definidos y en los decretos supremos emitidos hasta la fecha, evidencia una brecha normativa frente al creciente volumen de residuos tecnológicos derivados de la transición energética. En este contexto, el siguiente apartado presenta un análisis FODA de la Ley N.º 20.920 enfocado específicamente en el reciclaje de paneles solares, con el objetivo de identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del marco regulatorio actual frente a este nuevo desafío ambiental.

### **6.1.5.1 Conclusión FODA Ley N.º 20.920**

El análisis (Anexo 9.4) muestra que la Ley entrega un marco legal sólido y transversal para la gestión de residuos, basado en principios como la jerarquía de manejo, trazabilidad y responsabilidad extendida del productor. Sus fortalezas, entre ellas la posibilidad de incluir nuevos productos prioritarios mediante decreto supremo, los sistemas de gestión auditables y el fondo de apoyo al reciclaje, representan una base normativa robusta para proyectar la incorporación de los paneles fotovoltaicos en el futuro cercano.

Las oportunidades refuerzan este potencial, ya que la ley es adaptable y participativa, con mecanismos de consulta pública, financiamiento y educación ambiental, lo que abre espacio para incorporar a los PFV como aparatos eléctricos y electrónicos.

Sin embargo, el diagnóstico también revela debilidades críticas, por ejemplo, la ausencia de los paneles solares como producto prioritario, la falta de metas específicas y de normas técnicas claras para su manejo. Esto obliga a depender de decretos posteriores, lo que ralentiza la implementación y genera vacíos normativos en desmantelamiento, transporte y tratamiento.

Finalmente, las amenazas se concentran en el rápido crecimiento de la industria solar sin un marco específico de fin de vida, lo que puede derivar en exportación informal, acumulación de módulos en vertederos y riesgos ambientales y sanitarios. La lentitud en la dictación de decretos, junto al desconocimiento de las obligaciones REP por parte del sector solar, aumentan la posibilidad de un escenario crítico si no se actúa a tiempo.

En síntesis, este FODA evidencia que la ley constituye una oportunidad estratégica para regular los residuos fotovoltaicos, pero requiere de decretos supremos específicos y normas técnicas que aceleren su inclusión.

### **6.1.6 D.S. N.º 8/2017**

El Decreto Supremo N.º 8/2017 del Ministerio del Medio Ambiente establece el procedimiento para elaborar y revisar los decretos derivados de la Ley 20.920, garantizando transparencia mediante expedientes públicos, consultas ciudadanas y un análisis de impacto económico y social previo. Regula cómo se fijan metas de recolección y valorización de manera progresiva y revisable, además de obligaciones asociadas como ecodiseño, etiquetado y

separación en origen, definiendo también el rol de los productores y los requisitos de los sistemas de gestión (Decreto Supremo 8, 2017).

Con el propósito de profundizar en su alcance, se elaboró un análisis FODA, orientado a identificar las principales fortalezas y oportunidades que este decreto ofrece para su eventual aplicación en la gestión de residuos de PFV.

#### **6.1.6.1 Conclusión FODA D.S. N.º 8/2017**

El Decreto Supremo N.º 8/2017 se configura como un instrumento procedimental robusto que asegura transparencia, participación ciudadana y respaldo técnico en la dictación de decretos sectoriales bajo la Ley REP (Anexo 9.5). Sus fortalezas, como la obligatoriedad de consultas públicas, el análisis de impacto económico y social (AGIES) y la definición de productores y sistemas de gestión, lo convierten en una base normativa clave para habilitar la futura regulación de los residuos de paneles fotovoltaicos.

Las oportunidades se relacionan con la capacidad del decreto de incorporar los PFV como subcategoría de aparatos eléctricos y electrónicos, promoviendo obligaciones diferenciadas como ecodiseño, etiquetado y separación en origen. Además, el carácter participativo del procedimiento facilita la integración de municipios, recicladores y la cooperación internacional, lo que puede acelerar la innovación tecnológica y la instalación de infraestructura de reciclaje en Chile.

No obstante, el FODA revela debilidades importantes: el D.S 8 no regula directamente a los PFV, depende de decretos sectoriales que suelen tardar en dictarse, y carece de normas técnicas específicas para el tratamiento de estos residuos. A esto se suma la alta carga administrativa y financiera que puede afectar a pequeños importadores y distribuidores de paneles solares.

Finalmente, las amenazas destacan el riesgo de acumulación masiva de residuos FV si no se avanza con rapidez en decretos específicos, la falta de infraestructura nacional de reciclaje y la posibilidad de conflictos legales por parte de los productores. La lentitud en la revisión de metas (cada cinco años) también podría quedar rezagada frente al rápido avance tecnológico del sector solar.

En síntesis, el FODA del DS 8/2017 muestra que este reglamento es un pilar habilitante pero insuficiente por sí mismo, ya que, su potencial dependerá de la emisión oportuna de decretos específicos que incluyan a los PFV y definan metas claras de recolección, valorización y obligaciones asociadas. De lo contrario, existe un riesgo real de que la transición energética en Chile genere un pasivo ambiental difícil de gestionar.

## 6.2 Vacíos regulatorios actuales

Según los análisis FODA, el escenario actual evidencia una serie de vacíos regulatorios que limitan la posibilidad de avanzar hacia una gestión sustentable de estos residuos en Chile.

Algunos de los puntos e interrogantes que dejan la normativa son:

- **Ausencia de una inclusión explícita en la Ley REP:** Esta ley no contempla explícitamente a los paneles fotovoltaicos, lo que limita la aplicación de instrumentos económicos y obligaciones de gestión extendida al productor.
- **Falta normativa que clasifique a los PFV según peligrosidad:** Existe un vacío técnico jurídico respecto de criterios que permitan diferenciar entre paneles solares fotovoltaicos peligrosos y no peligrosos, lo que genera inseguridad jurídica en su gestión. Actualmente, en virtud de lo instruido por la autoridad sanitaria, todos los PFV deben ser gestionados como residuos peligrosos por defecto, salvo que un laboratorio autorizado certifique lo contrario. Si bien este enfoque precautorio asegura un mayor nivel de protección ambiental y sanitaria, también implica la aplicación de exigencias uniformes a tecnologías con composiciones diversas, lo que puede encarecer su gestión y limitar el desarrollo de procesos de valorización diferenciados.
- **No existen protocolos específicos de manejo, transporte o disposición final seguros:** No existe normativa o protocolos que indiquen como manejar estos residuos (paneles fotovoltaicos), quedando al criterio del gestor y a normas generales como el D.S. N°148/2004 (Decreto Supremo N°148, 2004).
- **Falta de normas técnicas:** La falta de normas técnicas específicas para el desmontaje, clasificación y tratamiento de componentes limita el desarrollo de una industria local de reciclaje. Esto fomenta la exportación de residuos o su disposición en vertederos, sin garantías de recuperación de materiales o mitigación de impactos.

- **Limitaciones en el control transfronterizo:** El D.S N.º 685 regula el movimiento internacional de residuos peligrosos (Decreto Supremo 685, 1992), pero actualmente no existe un mecanismo que facilite o restrinja la exportación/importación de paneles fotovoltaicos desechados.
- **Ausencia de trazabilidad y monitoreo del post uso:** Actualmente no existen métodos para hacer un seguimiento a los paneles fotovoltaicos existentes, lo cual dificulta medir el cumplimiento ambiental y social del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos instalados en el país.
- **Ausencia de un decreto supremo que establezca metas de recolección y valorización para paneles solares:** Ningún decreto implementa metas específicas para estos residuos, a diferencia de otros productos prioritarios como neumáticos.
- **Carencia de criterios para clasificación del residuo fotovoltaico:** La ley no entrega parámetros para determinar la peligrosidad de los residuos solares, a pesar de que pueden contener metales pesados o sustancias tóxicas.
- **Ausencia de requisitos sanitarios o ambientales específicos para residuos electrónicos de gran escala:** La ley no contempla un procedimiento simplificado o diferenciado para residuos voluminosos o de riesgo potencial como los paneles solares.
- **Lentitud normativa para responder a residuos tecnológicos emergentes:** La dependencia de decretos supremos para activar la REP en nuevos productos limita la capacidad de la ley para adaptarse de forma oportuna a cambios tecnológicos acelerados.
- **No se exige la declaración de la composición de materiales de PFV al momento de ingresar al país:** No existe trazabilidad de los componentes peligrosos que ingresan al país ni certeza de donde serán depositados en el fin de su vida útil.

En resumen, estos vacíos regulatorios reflejan una desconexión entre el avance tecnológico en materia de energías renovables y la capacidad institucional para gestionar adecuadamente los residuos que este desarrollo conlleva. La inexistencia de una legislación específica, protocolos técnicos y mecanismos de trazabilidad no solo dificulta el establecimiento de una economía circular en torno a los paneles fotovoltaicos, sino que también representa una amenaza potencial para la salud pública y el medio ambiente. Por ello, resulta urgente que las políticas públicas evolucionen al ritmo del despliegue solar, incorporando

normativas claras y específicas que permitan una gestión responsable, eficiente y sustentable de estos residuos en el largo plazo.

En este contexto, resulta fundamental considerar la Resolución Exenta N.º 310/2021 y la N.º 1.268/2023, que constituyen los primeros antecedentes normativos en reconocer los impactos potenciales de los módulos fotovoltaicos y marcan el inicio de una nueva etapa en la discusión sobre su gestión en el país. Posteriormente, se analizará la Resolución Exenta N.º 3.413/2025, que aprueba el proyecto definitivo de decreto destinado a incorporar a los paneles fotovoltaicos dentro del régimen de responsabilidad extendida del productor (REP) y que establece metas obligatorias de recolección y valorización. Este aspecto resulta particularmente relevante, pues permitirá definir la posición que adoptará Chile frente a la gestión de los desechos fotovoltaicos una vez que el Decreto Supremo propuesto sea aprobado y publicado oficialmente.

### **6.3 Resolución Exenta N.º 310/2021 y N.º 1.268/2023**

La evolución normativa para la gestión de paneles fotovoltaicos (PFV) en Chile se inicia con la Resolución Exenta 310/2021, que puso término al proceso exclusivo de pilas e inauguró un decreto conjunto de Pilas y Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), incorporando por primera vez a los PFV como categoría preliminar (Resolución Exenta 310, 2021). Posteriormente, el anteproyecto de 2022 los excluyó de metas, argumentando su larga vida útil (Resolución Exenta 207, 2022), lo que generó observaciones ciudadanas y derivó en la Resolución N.º 1.268/2023, que abrió un proceso de información pública para evaluar su incorporación.

La resolución Exenta N.º 1.268, emitida por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile en el año 2023, es un paso crucial hacia la regulación de los residuos de los paneles fotovoltaicos bajo el régimen de la Ley REP, en la categoría de “Pilas y Aparatos Eléctricos y Electrónicos” (P+AEE).

La resolución, en base a lo instruido en el Oficio ORD B32/N.º 2.516/2022, reconoce que los paneles fotovoltaicos, al finalizar su vida útil, pueden generar daños al medio ambiente y a la salud de las personas, ya que pueden contener materiales peligrosos como el plomo y el

cadmio, clasificándolos como residuos peligrosos (Resolución Exenta N.º 1.268, 2023), justificando así, la necesidad de regulación bajo Ley REP.

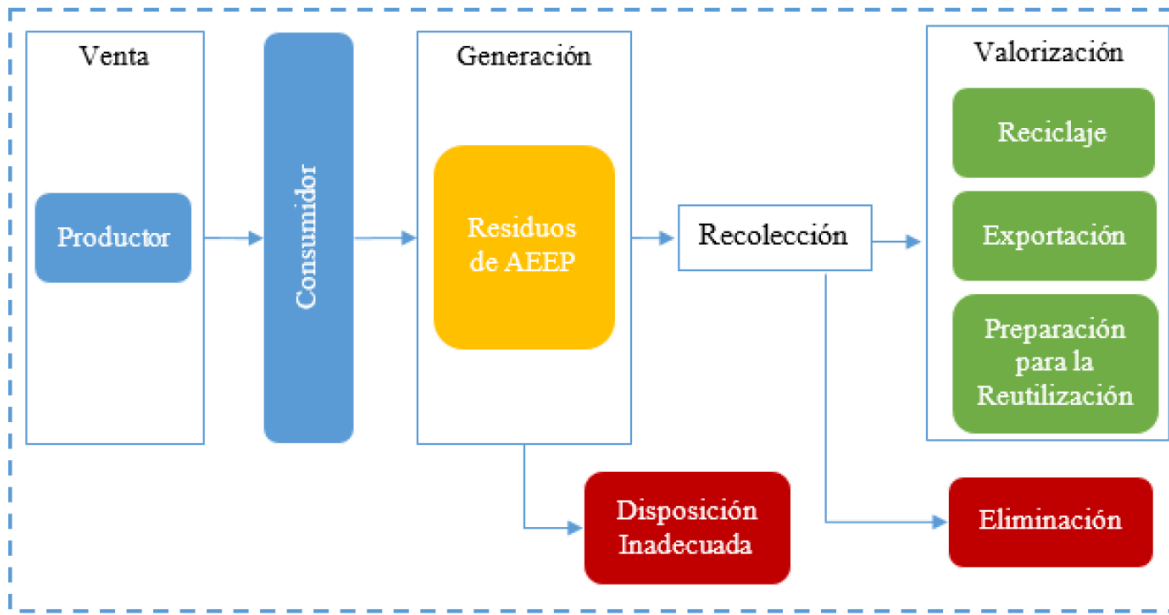
Adicionalmente, la Resolución pasó por un periodo de información pública, en el cual invitó a ciudadanos, empresas y organizaciones a presentar antecedentes técnicos, económicos y ambientales relacionados a los paneles fotovoltaicos, para luego ser recopilados por el Ministerio del Medio Ambiente y elaborar así, una propuesta de Decreto Supremo que establezca las metas y obligaciones específicas para los paneles fotovoltaicos bajo la ley REP.

Este proceso busca cerrar los vacíos normativos identificados en el marco legal vigente y avanzar hacia una gestión ambientalmente responsable de los residuos fotovoltaicos, en coherencia con los principios de economía circular y sostenibilidad. En este contexto, la reciente Resolución Exenta N.º 3.413/2025 marca un nuevo hito en la consolidación de este proceso, lo que se abordará en el siguiente apartado.

#### **6.4 Resolución Exenta N.º 3.413/2025**

La Resolución Exenta N.º 3.413/2025 del Ministerio del Medio Ambiente aprueba la propuesta del Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) en el marco de la Ley 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP). El texto establece un marco regulatorio integral que obliga a los productores a organizar y financiar la gestión de los residuos que generan los productos que ponen en el mercado, fijando metas graduales y mecanismos de control y fiscalización. Entre las principales novedades se encuentra la inclusión de categorías específicas de AEE, como los aparatos de intercambio de temperatura y, por primera vez, los paneles fotovoltaicos (PFV), reflejando la creciente importancia de su gestión en un país con alta penetración de energía solar (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025).

El Análisis de Impacto Económico y Social del proyecto definitivo identifica cada etapa en la que se generaran impactos como consecuencia de la regulación (ver Fig. 12), lo que facilitara el entendimiento de la normativa para el análisis.



*Fig. 12: Ciclo de vida del producto prioritario Pilas y Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Departamento de Economía Ambiental, 2025).*

La normativa establece un marco de responsabilidades diferenciado para los actores involucrados en la gestión de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos (P+AEE), incluyendo a productores, comercializadores, gestores de residuos, municipalidades, recicladores de base y consumidores industriales. Adicionalmente, introduce un esquema de metas de recolección expresadas como porcentaje respecto de los residuos generados. Estas metas se estructuran en tres niveles: (i) una meta general que abarca todos los P+AEE, con excepción de los paneles fotovoltaicos industriales; (ii) una meta específica para los Aparatos de Intercambio de Temperatura (AIT), cuyo cumplimiento simultáneamente contribuye al logro de la meta general; y (iii) una meta específica destinada a la recolección de los PFV industriales, atendiendo a su particular complejidad técnica y a los volúmenes proyectados de residuos (ver Tabla 8).

Tabla 8: Metas de recolección.

|                                | <b>Meta general</b> | <b>Meta específica para AIT</b> | <b>Meta específica para PFV</b> |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Primer año</b>              | 3%                  | Sin meta                        | Sin meta                        |
| <b>Segundo año</b>             | 5%                  | Sin meta                        | Sin meta                        |
| <b>Tercer año</b>              | 8%                  | 6%                              | 10%                             |
| <b>Cuarto año</b>              | 12%                 | 9%                              | 14%                             |
| <b>Quinto año</b>              | 16%                 | 13%                             | 18%                             |
| <b>Sexto año</b>               | 20%                 | 17%                             | 22%                             |
| <b>Séptimo año</b>             | 24%                 | 21%                             | 28%                             |
| <b>Octavo año</b>              | 30%                 | 25%                             | 34%                             |
| <b>Noveno año</b>              | 37%                 | 30%                             | 42%                             |
| <b>A contar del décimo año</b> | 45%                 | 30%                             | 50%                             |

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025)

Otro aspecto importante es la definición de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), la que indica que los productores que introduzcan pilas y/o AEE al mercado deberán organizar y financiar la recolección, transporte, almacenamiento y valorización de los residuos. Además, indica que los productores deben inscribirse en el RETC (Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes). Cabe señalar que, las Microempresas quedan exentas de cumplir metas de recolección y valorización, pero igualmente, deben entregar información anual sobre su gestión, lo que permite trazabilidad al sistema.

La normativa establece que los sistemas de gestión pueden ser de carácter individual o colectivo, dependiendo de cómo los productores decidan organizarse para cumplir con sus obligaciones. En este contexto, se incorpora la figura de los Grandes Sistemas Colectivos de Gestión (GRANSIC), conformados por veinte o más productores no relacionados, los cuales cuentan con mayores atribuciones para alcanzar sus metas de manera conjunta y eficiente. De igual forma, se dispone que los sistemas colectivos integrados exclusivamente por productores de paneles fotovoltaicos (PFV) o de Aparatos de Intercambio de Temperatura (AIT) puedan cumplir sus obligaciones utilizando cualquier residuo correspondiente a su categoría, lo que permite especializar la gestión en flujos de residuos que presentan desafíos técnicos y ambientales particulares.

Por otro lado, la normativa fija limitaciones a la presencia de sustancias peligrosas en pilas introducidas al mercado nacional. El artículo 42 establece restricciones específicas para componentes como el mercurio y el cadmio (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025), en coherencia con los compromisos internacionales suscritos por Chile en materia ambiental y de salud pública. En este marco, los productores tienen la obligación de declarar el cumplimiento de dichos límites o, en su defecto, acreditar las excepciones que contempla la normativa, excluyendo a los PFV.

En relación con los mecanismos de cobertura y recolección, se exige la implementación de un sistema progresivo de recolección domiciliaria, complementado con la operación de instalaciones de recepción y almacenamiento distribuidas de manera territorialmente equitativa. Esta medida busca garantizar un acceso descentralizado y justo a la gestión de residuos en todo el territorio nacional, evitando concentrar la infraestructura en determinadas zonas y fomentando la inclusión de la ciudadanía en el proceso.

Finalmente, el financiamiento de los sistemas de gestión deberá ser asumido directamente por los productores, en proporción al peso de las pilas o aparatos eléctricos y electrónicos que introduzcan en el mercado. En el caso particular de los paneles fotovoltaicos, debido a su larga vida útil estimada entre veinte y treinta años, se establece la necesidad de prever un fondo financiero de largo plazo que asegure los recursos necesarios para la correcta gestión futura de estos residuos. Con ello, se busca otorgar sostenibilidad económica al sistema y evitar que los costos de manejo se trasladen al Estado o a la sociedad en el mediano y largo plazo.

En este contexto, resulta pertinente realizar un análisis FODA de la propuesta del nuevo decreto, con especial énfasis en su impacto sobre la gestión de residuos fotovoltaicos, identificando las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que plantea su implementación para la industria, la institucionalidad ambiental y los consumidores.

#### **6.4.1 Conclusión FODA D.S. N.º 3.413/2025**

El análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la REP (Anexo 9.6) aplicada a pilas, AEE y particularmente a paneles fotovoltaicos (PFV), muestra un marco regulatorio robusto y con proyección, pero aún con brechas significativas para su

implementación efectiva. No obstante, esta normativa constituye un avance regulatorio histórico al incorporar por primera vez a los paneles fotovoltaicos como producto prioritario bajo la Ley REP, estableciendo metas obligatorias de recolección y valorización. Entre sus principales fortalezas destacan la definición de categorías diferenciadas, la aplicación de metodologías técnicas para proyectar residuos (utilizadas en normas internacionales), la flexibilidad en los mecanismos de valorización y la incorporación de obligaciones de financiamiento a largo plazo. Estos elementos fortalecen la trazabilidad, alinean a Chile con compromisos internacionales y refuerzan la sostenibilidad del sector solar en el marco de la economía circular.

Las oportunidades se relacionan con el desarrollo de una industria nacional de reciclaje de PFV, la generación de empleos verdes, la atracción de inversión extranjera, el impulso a la innovación tecnológica en recuperación de materiales críticos (plata, silicio, telurio, entre otros) y reutilización de PFV industriales en sectores urbanos o rurales. Asimismo, la REP puede fomentar la educación ambiental y alinear a Chile con las metas de reciclaje de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), donde actualmente se presenta un rezago significativo (OCDE, 2025)

Respecto a las debilidades, Existen importantes incertidumbres respecto de los flujos de residuos de paneles fotovoltaicos (PFV), debido a su prolongada vida útil, así como una marcada carencia de infraestructura específica para su valorización en el país. A ello se suman los altos costos iniciales de implementación de la REP, el desfavorable balance costo-beneficio (Departamento de Economía Ambiental, 2025), la dependencia tecnológica internacional y la limitada capacidad de fiscalización de la Superintendencia. Una debilidad adicional radica en la ausencia de un piso mínimo de valorización exclusivo para los PFV, dado que la normativa establece un 75% de valorización de forma general para pilas y AEE, desaprovechando que los PFV podrían superar naturalmente ese umbral. Asimismo, persisten vacíos normativos, como la falta de clasificación de peligrosidad según tipo de panel y la ausencia de límites claros a las concentraciones de sustancias peligrosas, lo que resta certeza técnica y jurídica al sistema.

En cuanto a las amenazas, se advierte el riesgo de resistencia por parte de la industria solar ante los costos adicionales, la posibilidad de distorsiones de mercado que prioricen residuos más fáciles de valorizar, la competencia de importadores informales, la dependencia

de la exportación de residuos bajo el Convenio de Basilea, y la falta de cultura de reciclaje en Chile. Estos factores pueden comprometer el cumplimiento de las metas, generando acumulación de residuos en rellenos sanitarios.

En conclusión, la Resolución Exenta N.º 3.413/2025 aborda la ausencia de un marco específico para los paneles fotovoltaicos (PFV), estableciendo un horizonte regulatorio definido con metas progresivas. Sin embargo, aún persisten vacíos normativos relevantes que dificultan su implementación.

#### **6.4.2 Desafíos de implementación**

La Resolución Exenta N.º 3.413/2025, que aprueba el proyecto definitivo de decreto que incorpora por primera vez a los paneles fotovoltaicos dentro del régimen de responsabilidad extendida del productor (REP), y que posteriormente fue validado por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático, constituye un hito regulatorio en Chile (Acuerdo N.º 13, 2025). Sin embargo, una vez que el proyecto se convierta en Decreto Supremo, su efectiva aplicación enfrentará una serie de desafíos de implementación que van más allá del ámbito jurídico y que exigen un abordaje integral. Por un lado, se evidencian desafíos técnicos e institucionales, relacionados con la ausencia de infraestructura especializada para el reciclaje de paneles, la necesidad de normas técnicas específicas y la capacidad de fiscalización de las instituciones competentes. A ello se suman desafíos económicos, vinculados a la sostenibilidad financiera de los sistemas de gestión, la modulación de tarifas y los elevados costos de valorización frente al bajo valor de mercado de los materiales recuperados. Finalmente, existen también desafíos sociales, que incluyen la baja cultura de reciclaje en el país, la necesidad de integrar a los recicladores de base y la importancia de generar confianza y corresponsabilidad en los consumidores e industriales.

En este contexto, resulta fundamental analizar en detalle estos tres ejes, técnico-institucional, económico y social, para comprender las barreras que podrían limitar el éxito de la política y, al mismo tiempo, identificar las oportunidades que permitan fortalecer su implementación en el marco de la transición hacia una economía circular.

### 6.4.2.1 Desafíos técnicos e institucionales

La implementación del Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización para pilas y aparatos eléctricos y electrónicos, incorporando a los paneles fotovoltaicos como categoría regulada, plantea una serie de desafíos técnicos e institucionales que pueden condicionar su eficacia en el corto y mediano plazo.

En primer lugar, se identifica la ausencia de infraestructura especializada para el reciclaje de paneles solares en Chile. Actualmente, el país no dispone de plantas a gran escala de tratamiento dedicadas exclusivamente a paneles fotovoltaicos, lo que obliga a depender de procesos incipientes de coprocesamiento o, en su defecto, de la exportación de residuos bajo el marco del Convenio de Basilea. Por otro lado, el Departamento de Economía Ambiental, en base a sus proyecciones, estiman la cantidad de instalaciones adicionales de pretratamiento (ver Tabla 9) y las instalaciones de recepción necesarias para cumplir con la regulación (ver Tabla 10). Estas proyecciones ponen de manifiesto el desafío técnico y de infraestructura que enfrentará el país, considerando que los residuos de paneles fotovoltaicos y de aparatos eléctricos y electrónicos requieren procesos diferenciados. Ello implica la incorporación de tecnologías que aún no cuentan con una amplia presencia en Chile o que, en algunos casos, todavía no se encuentran disponibles.

*Tabla 9: Cantidad acumulada de instalaciones adicionales de pretratamiento.*

| 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 1    | 4    | 7    | 10   | 14   | 20   | 26   | 34   | 34   |

*Fuente: Ministerio del Medio ambiente (Departamento de Economía Ambiental, 2025).*

*Tabla 10: Instalaciones de recepción necesarias para cumplir con la regulación.*

| Zona geográfica | Número de instalaciones necesarias para cumplir con la regulación |
|-----------------|---|
| Norte Chico     | 3   |
| Norte Grande    | 5   |
| Central         | 33  |
| Sur             | 4   |
| Austral         | 2   |
| Total           | 47  |

*Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (Departamento de Economía Ambiental, 2025).*

También, de la Tabla 10 se desprende la existencia de desafíos asociados a la descentralización de la infraestructura, dado que la mayor parte de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) se concentra en la zona central, mientras que la mayoría de los paneles fotovoltaicos (PFV) se ubican en la zona norte. En este escenario, se prevé la necesidad de desarrollar infraestructura especializada y territorialmente distribuida, capaz de gestionar los elevados flujos de residuos que se proyectan en ambas áreas.

Otro desafío técnico está asociado a la falta de normas técnicas específicas para desmontaje, clasificación y tratamiento de los componentes de los PFV. A diferencia de los aparatos de intercambio de temperatura, que cuentan con referencias explícitas a normas NCh en el decreto (Art. 38), los paneles fotovoltaicos carecen de estándares nacionales que regulen aspectos críticos como el manejo seguro del vidrio templado, el silicio, los metales pesados o la separación de módulos. Esta ausencia genera incertidumbre tanto para los gestores como para los productores, retrasando la consolidación de una industria local de reciclaje.

Respecto a los desafíos institucionales, se prevé el desafío de la necesidad de articular eficientemente a múltiples actores (Ministerio del Medio Ambiente, Aduana, Ministerio de Salud, municipalidades, productores, gestores y recicladores base), bajo un marco regulatorio que aún se encuentra en construcción. En este sentido, la experiencia acumulada en la implementación de la Ley REP ha evidenciado complejidades que se replican y potencian en el caso de los paneles fotovoltaicos. A la fecha, se han detectado dificultades en la creación y consolidación de sistemas de gestión colectivos, debido tanto a las exigencias que impone la normativa como a las tensiones derivadas de su revisión desde la perspectiva de la libre competencia.

Particularmente, la Fiscalía Nacional Económica ha puesto atención en las condiciones contractuales establecidas por algunos sistemas colectivos para la gestión de residuos, advirtiendo eventuales riesgos de concentración o prácticas restrictivas. Ello ha generado una disonancia institucional, pues las preocupaciones de la autoridad de competencia no siempre han estado alineadas con los objetivos de la autoridad ambiental, orientados a asegurar la valorización de residuos y el cumplimiento de metas de recolección. Como consecuencia, se ha producido un escenario en el cual el Ministerio del Medio Ambiente ha aprobado sistemas de gestión colectivos, mientras que sus estatutos y normas orgánicas han sido objeto de

impugnaciones ante el Tribunal de Defensa de la Libre Competencia (Massardo, 2025). Esta situación genera incertidumbre entre los productores de productos prioritarios, quienes, aun estando sujetos a metas bajo la Ley REP, enfrentan un marco institucional fragmentado y en permanente ajuste.

Por otro lado, la normativa establece obligaciones complejas de trazabilidad (Art. 16, 42), incluyendo reportes periódicos de productores y consumidores industriales, así como el registro en el RETC. Sin embargo, la supervisión de estos flujos requiere recursos técnicos y humanos que actualmente no están plenamente disponibles, lo que podría generar brechas en el cumplimiento efectivo.

En síntesis, los desafíos técnicos e institucionales se concentran en la falta de infraestructura y normas técnicas específicas, la limitada capacidad de fiscalización y la necesidad de una coordinación interinstitucional más robusta. Superarlos exigirá inversión en capacidades tecnológicas, fortalecimiento institucional y la creación de estándares nacionales que aseguren un manejo seguro y sustentable de los residuos fotovoltaicos.

#### **6.4.2.2 Desafíos económicos**

En el plano económico, uno de los principales desafíos radica en la alta inversión que requiere la implementación de la infraestructura necesaria para cumplir con las metas de recolección y valorización de pilas, aparatos eléctricos y electrónicos y, en particular, de paneles fotovoltaicos. La creación de plantas de pretratamiento, instalaciones de recepción y centros de valorización implica costos iniciales significativos, los cuales deben ser asumidos por los productores bajo el principio de la responsabilidad extendida. A ello se suma la necesidad de garantizar la sostenibilidad financiera de los sistemas de gestión en el largo plazo, especialmente considerando que los residuos de paneles fotovoltaicos se generarán masivamente recién en 20 a 30 años más, lo que obliga a diseñar mecanismos de financiamiento anticipado, como fondos de provisión o esquemas tarifarios modulados. Esta podrá generar complicaciones a los productores, ya que deben internalizar costos futuros en un mercado aún incipiente, al mismo tiempo que abre interrogantes sobre la competitividad de los sistemas colectivos, la distribución equitativa de los costos entre empresas de distinto tamaño y el impacto final en los precios de los productos. En línea con ello, el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) del proyecto definitivo estimó costos totales de aproximadamente

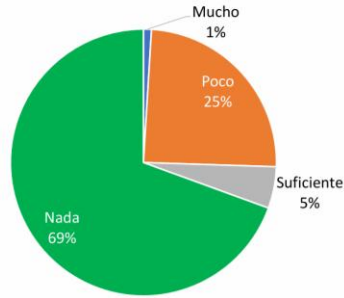
US\$ 785 millones frente a beneficios de US\$ 504 millones, arrojando una razón beneficio/costo de 0,64, lo que indica que por cada dólar invertido se obtendría un beneficio de 64 centavos de dólar (Departamento de Economía Ambiental, 2025).

A estos costos estructurales se suma el riesgo de multas por incumplimiento de metas, que representan un desafío económico adicional. La Ley 20.920 faculta a la Superintendencia del Medio Ambiente para imponer sanciones que, dependiendo de la gravedad, pueden ascender a miles de UTA. En este contexto, el incumplimiento no solo genera un costo directo para los productores, sino que también introduce una fuente de incertidumbre financiera a los gestores autorizados, obligando a las empresas a provisionar recursos para eventuales sanciones. Como resultado de estas condiciones, en algunos casos se han observado licitaciones declaradas desiertas (Pereda, 2025), ya que los potenciales gestores y oferentes consideran inviables los contratos de recolección o valorización en las condiciones económicas actuales, lo que refleja de manera tangible la fragilidad del sistema y la necesidad de ajustar los incentivos para garantizar su funcionamiento efectivo.

#### **6.4.2.3 Desafíos sociales**

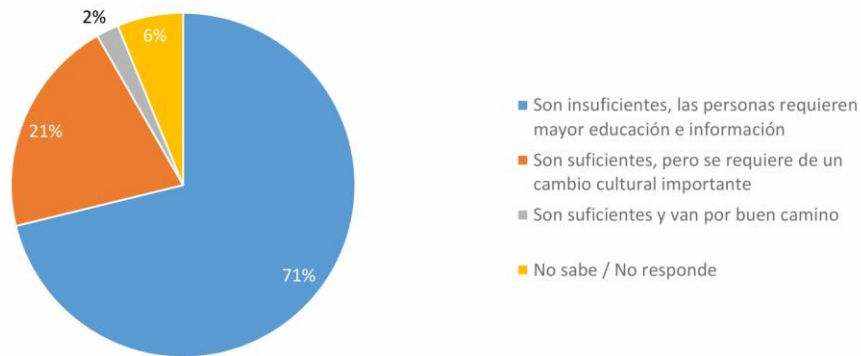
En el plano social, la implementación de la REP enfrenta barreras importantes relacionadas con la participación ciudadana y la percepción pública. El sondeo de 2024 reveló que solo un 32% de la población declaró haber reciclado aparatos eléctricos y electrónicos en los últimos seis meses, lo que muestra una baja participación efectiva. Entre las principales razones por las que las personas conservan residuos electrónicos en sus hogares, un 58% señaló no saber dónde llevarlos (Instituto UNAB de Políticas Públicas, 2024), evidenciando un déficit en la infraestructura accesible y en la información disponible.

Asimismo, existe un bajo nivel de conocimiento sobre la Ley REP: un 69% de los encuestados afirmó no tener ningún grado de información al respecto, y solo un 1% dijo estar muy informado (ver Fig. 13). Sin embargo, el estudio también muestra una alta disposición al cambio: un 94% de los encuestados estaría dispuesto a llevar residuos a puntos de recepción cercanos a su hogar y un 93% apoyaría la instalación de estas instalaciones en su barrio, lo que refleja una aceptación social positiva hacia la expansión de infraestructura.



*Fig. 13: Resultado encuesta: ¿Qué tan informado se encuentra sobre la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP o de Reciclaje) y sus objetivos? (Instituto UNAB de Políticas Públicas, 2024).*

Finalmente, un 71% de los encuestados considera insuficientes las acciones del Estado para promover información y educación en reciclaje de AEE (ver Fig. 14), y un contundente 97% está de acuerdo o muy de acuerdo en que se requieren campañas de educación ciudadana a nivel nacional. Esto confirma que los desafíos sociales no se limitan a la infraestructura de recolección, sino que incluyen también la brecha cultural e informativa, la cual será determinante para la efectividad del sistema.



*Fig. 14: Resultado encuesta: ¿Cuál es su opinión, respecto a las acciones del Estado para promover la información y educación ciudadana sobre el reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos? (Instituto UNAB de Políticas Públicas, 2024).*

En síntesis, los principales desafíos sociales de la REP para pilas, AEE y PFV se concentrarán en la baja participación ciudadana y el desconocimiento de la normativa, junto con la necesidad de descentralizar la infraestructura y fortalecer la inclusión de recicladores de base. No obstante, la alta disposición de la población a participar revela una oportunidad clave si se refuerza la educación ambiental y la accesibilidad territorial.

## 6.5 Vacíos regulatorios actuales v/s Resolución Exenta N.º 3.413












La gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en Chile ha estado marcada por vacíos normativos, derivados de la ausencia de su inclusión explícita en la Ley N.º 20.920, lo que generó incertidumbre sobre su peligrosidad, protocolos de manejo y obligaciones de los productores. La Resolución Exenta N.º 3.413/2025 representa un hito al aprobar la propuesta de decreto que incorpora a los paneles como categoría regulada dentro del régimen REP, estableciendo metas específicas de recolección y valorización. Este capítulo analiza cómo dicha normativa busca superar las brechas regulatorias existentes y sus implicancias para la consolidación de un marco de reciclaje sustentable.

### 6.5.1 Escenario normativo ante nueva normativa

Para el análisis se retoman los vacíos regulatorios identificados en el apartado 6.2, con el propósito de evaluar en qué medida la propuesta de Decreto Supremo ofrece respuestas concretas a dichas brechas normativas. Este contraste permite no solo identificar los avances introducidos por la nueva regulación, sino también reconocer aquellos aspectos que aún requieren desarrollo para garantizar una gestión integral y sustentable de los residuos fotovoltaicos.

A continuación, se sintetizan los principales vacíos regulatorios detectados en la gestión de residuos fotovoltaicos y su contraste con los avances introducidos por la Resolución Exenta N.º 3.413/2025 (ver Tabla 11).

*Tabla 11: Tabla resumen de Vacíos regulatorios actuales v/s Resolución Exenta N.º3.413.*

| Vacío Regulatorio actual   | Estado frente a R.E. N.º 3.413/2025   |
|--|---|
| 1. Ausencia de inclusión explícita en la Ley REP.                                    | Resuelto     |
| 2. Falta de normativa que clasifique a los PFV según peligrosidad.                   | No resuelto  |
| 3. Inexistencia de protocolos específicos de manejo, transporte o disposición final. | Parcial      |
| 4. Falta de normas técnicas para desmontaje, clasificación y tratamiento de PFV.     | No resuelto  |
| 5. Limitaciones en el control transfronterizo de residuos PFV.                       | No resuelto  |
| 6. Ausencia de trazabilidad y monitoreo post uso.                                    | Resuelto     |
| 7. Ausencia de un decreto supremo con metas específicas para PFV.                    | Resuelto     |
| 8. Carencia de criterios para clasificación del residuo fotovoltaico.                | No resuelto  |
| 9. Ausencia de requisitos sanitarios o ambientales diferenciados para PFV.           | No resuelto  |
| 10. Lentitud normativa frente a residuos tecnológicos emergentes.                    | Parcial      |
| 11. Declaración de composición de PFV al ingreso.                                    | No resuelto  |

*Fuente: Elaboración propia.*

Respecto a los puntos abordados, se generan los siguientes comentarios respectivamente:

- 1) **Resuelto:** Si bien la Ley N.º 20.920 no menciona expresamente a los paneles fotovoltaicos, la R.E. N.º 3.413/2025 los incorpora como categoría dentro de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), estableciendo metas específicas de recolección y valorización. Además, diferencia los paneles fotovoltaicos domiciliarios y de uso industrial.
- 2) **No resuelto:** La clasificación de peligrosidad de los PFV sigue dependiendo del D.S. N.º 148/2003 sobre residuos peligrosos, el cual se aplica de manera general y no específica. En la R.E. N.º 3.413 no introduce criterios diferenciados para distinguir paneles peligrosos de no peligrosos, lo que no permite diferenciarlos y aplicar medidas específicas de reciclaje o disposición.
- 3) **Parcial:** La R.E. N.º 3.413 establece la obligación de que los residuos de PFV sean gestionados exclusivamente por sistemas autorizados y bajo esquemas de trazabilidad, mencionando exigencias generalizadas para su manejo (Art.38,2). Sin embargo, no define protocolos técnicos detallados de desmontaje, transporte o disposición final. A modo de contraste, la misma resolución sí contempla exigencias especiales para los aparatos de intercambio de temperatura (Art.38,1), que deben manejarse bajo procedimientos específicos debido a la presencia de refrigerantes y aceites peligrosos. En el caso de los PFV, no se establecen lineamientos equivalentes para el retiro de componentes como vidrio, marcos metálicos o celdas con metales pesados, lo que obliga a los gestores a aplicar normas generales de residuos peligrosos (D.S. N.º 148/2003) sin un marco técnico estandarizado.
- 4) **No resuelto:** El decreto proyectado no establece ni menciona normas técnicas específicas para el desarme o reciclaje de componentes de PFV, lo que limita el desarrollo de procesos estandarizados a nivel nacional.
- 5) **No resuelto:** Aunque Chile es parte del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación, la R.E. N.º 3.413 no innova en mecanismos específicos para el control de exportación o importación de residuos fotovoltaicos. En consecuencia, no existe normativa nacional que articule directamente esta obligación internacional con procedimientos concretos de

trazabilidad y autorización aduanera aplicables a los PFV. Esto mantiene una brecha regulatoria relevante, ya que los residuos fotovoltaicos con componentes peligrosos podrían ser enviados al extranjero bajo las mismas reglas generales que otros residuos peligrosos, sin un marco especializado que asegure su valorización o disposición final en condiciones ambientalmente racionales.

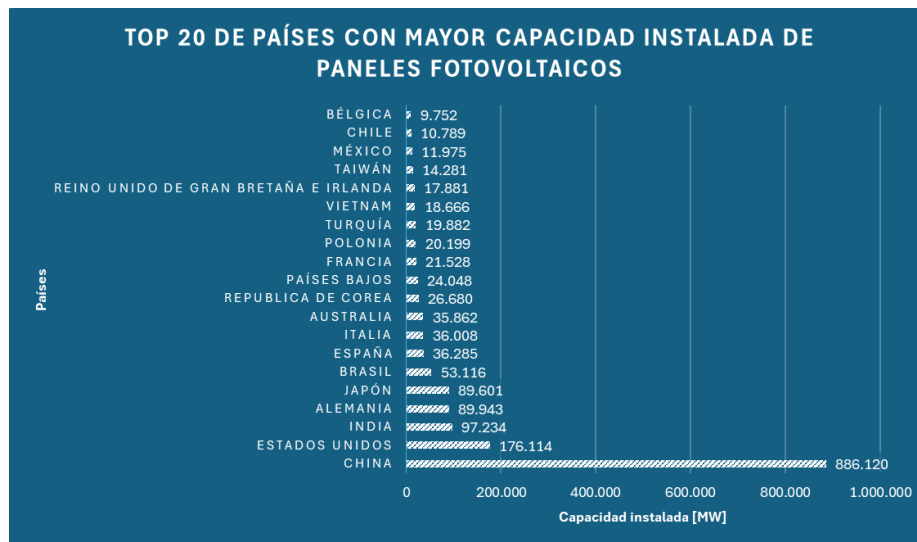
- 6) **Resuelto:** La R.E. N.º 3.413/2025 establece la obligación de inscripción de los productores e importadores en el RETC, a través del cual deben reportar la cantidad de paneles fotovoltaicos puestos en el mercado y los residuos gestionados.
- 7) **Resuelto:** La R.E. N.º 3.413 crea metas específicas para los paneles fotovoltaicos, con un 10% a partir del tercer año y hasta un 50% en el décimo, respondiendo directamente a este vacío.
- 8) **No resuelto:** El decreto no introduce tipologías que permitan distinguir entre paneles fotovoltaicos industriales, domiciliarios o según tipo de tecnología, más allá de la meta general establecida. La única diferenciación que incorpora es de carácter dimensional: se consideran como paneles fotovoltaicos (PFV) únicamente aquellos que tengan al menos una dimensión exterior mayor a 50 cm, mientras que los de menor tamaño se clasifican dentro de la categoría “otros aparatos eléctricos y electrónicos” (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025). Este criterio, aunque útil para delimitar el alcance de la regulación, no sustituye la necesidad de tipologías técnicas que reflejen la heterogeneidad de los residuos fotovoltaicos y sus distintos riesgos ambientales.
- 9) **No resuelto:** El Ministerio de Salud ya había indicado que los PFV deben tratarse como residuos peligrosos por defecto, pero la R.E. N.º 3.413 no establece exigencias sanitarias diferenciadas.
- 10) **Parcial:** La inclusión de los paneles fotovoltaicos en la R.E. N.º 3.413/2025 constituye un avance relevante, pero también revela la lentitud del marco regulatorio chileno para identificar y regular residuos asociados a tecnologías emergentes. En el caso de los PFV, la regulación llega más de una década después de su masiva instalación en el país, lo que genera un desfase entre la expansión tecnológica y su gestión ambiental. Por lo tanto, la normativa reacciona de manera reactiva y no preventiva, limitando la capacidad de abordar oportunamente los riesgos asociados a nuevos flujos de desechos tecnológicos.

**11) No resuelto:** La normativa no establece la obligación de declarar la composición química o material de los paneles fotovoltaicos al momento de su importación, lo cual dificulta una gestión diferenciada según su peligrosidad. Esta ausencia impide conocer de manera oficial si los módulos contienen sustancias críticas como cadmio, plomo o selenio, que determinan riesgos ambientales y sanitarios.

El análisis de los vacíos regulatorios frente a la R.E. N.º 3.413/2025 muestra avances significativos, como la incorporación de los paneles fotovoltaicos al régimen REP y la fijación de metas específicas. No obstante, persisten limitaciones en protocolos técnicos, criterios de peligrosidad y articulación con compromisos internacionales, junto con la falta de normativas que integren de manera efectiva a las distintas instituciones competentes. Esto refleja un marco regulatorio aún reactivo y fragmentado. En este contexto, se vuelve necesario contrastar la experiencia internacional, donde países como Alemania y Japón han establecido mecanismos preventivos y de trazabilidad integral. El siguiente capítulo aborda este análisis comparativo para extraer aprendizajes aplicables al caso chileno.

## **6.6 Análisis Comparativo Internacional**

El análisis comparativo internacional constituye una herramienta clave para identificar buenas prácticas y marcos regulatorios aplicables a la gestión de residuos fotovoltaicos en Chile. En este capítulo se revisan las experiencias de distintos países líderes en energía solar, considerando tanto su capacidad instalada como los instrumentos normativos que han desarrollado para enfrentar el desafío del reciclaje. El gráfico de la Fig. 15 muestra el ranking de los veinte países con mayor capacidad fotovoltaica instalada en 2024, según datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), donde destacan China, Estados Unidos e India como potencias en términos de volumen, seguidos por Alemania, Japón y Brasil. En este listado, Chile ocupa una posición destacada en el contexto latinoamericano, con 10,8 GW instalados que lo sitúan como el segundo país de la región después de Brasil y dentro de los veinte principales a nivel mundial.



*Fig. 15: Ranking de los Top 20 países con mayor capacidad fotovoltaica instalada (Elaboración propia, fuente de datos IRENA, 2024).*

Para este estudio, se optó por focalizar el análisis en Alemania, Francia y Japón. La selección responde a criterios de relevancia normativa, transferibilidad de experiencias y diversidad de enfoques regulatorios. Alemania se estudia por su papel pionero en Europa y por la solidez de su marco jurídico en materia de reciclaje de equipos eléctricos y electrónicos, que incluye de manera explícita a los paneles solares. Francia se incluye por ser el primer país en aplicar un modelo especializado de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) a los módulos fotovoltaicos, con un sistema colectivo gestionado por el eco-organismo SOREN. Japón, por su parte, aporta una visión distinta, basada en la innovación tecnológica, el financiamiento público-privado y la articulación institucional como ejes para abordar la futura ola de residuos solares.

En este contexto, se descartó profundizar en los casos de China y Estados Unidos, pese a su liderazgo cuantitativo, debido a que sus realidades presentan características difícilmente extrapolables al contexto chileno: China concentra una escala de mercado y un rol manufacturero global que no resulta comparable con la situación nacional, mientras que Estados Unidos carece de un esquema unificado a nivel federal, presentando una fuerte heterogeneidad normativa entre estados. Por estas razones, se privilegió estudiar a Alemania, Francia y Japón, cuyos marcos regulatorios y experiencias ofrecen referencias más pertinentes y aplicables para el diseño e implementación de políticas en Chile.

## **6.6.1 Alemania**

Alemania es considerado un referente internacional en materia de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), incluyendo los paneles fotovoltaicos (PFV). Su marco legal se sustenta en la Ley de Economía Circular (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG, 2012) y en la Ley de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (ElektroG, 2005; reformada en 2015 y 2022), que incorporan y adaptan las disposiciones de la Directiva WEEE 2012/19/UE. Estas normativas posicionan a los PFV dentro de un sistema de responsabilidad extendida del productor (REP), con metas obligatorias de reciclaje, requisitos técnicos específicos de tratamiento, sistemas de trazabilidad y reglas de control aduanero y transfronterizo.

### **6.6.1.1 Ley de Economía Circular (KrWG)**

La Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), vigente desde el 1 de junio de 2012 y modificada en 2020 para implementar la Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea (2008/98/CE, enmendada en 2018), constituye el marco general de la política de residuos en Alemania. La última reforma sustantiva entró en vigor el 29 de octubre de 2020, y en 2023 se introdujeron ajustes adicionales con vigencia desde el 1 de enero de 2024. Por otro lado, es preciso mencionar que la KrWG crea el marco normativo general, pero no dicta obligaciones específicas para paneles solares.

A continuación, se presentan algunos puntos relevantes de esta ley relacionados a los paneles fotovoltaicos (KrWG, 2023).

#### **i. Objetivos generales**

- Conservación de recursos naturales.
- Protección de la salud y del medio ambiente.
- Impulso a un modelo de economía circular que prioriza la prevención de residuos y fomenta el uso de materias primas secundarias.
- Promoción de la innovación en productos y servicios sostenibles, incluyendo criterios de diseño ecológico y compras públicas verdes.

Como se observa, estos objetivos respaldan políticas que obligan a que los módulos fotovoltaicos se diseñen con criterios de eco-diseño y durabilidad, facilitando su reciclaje.

## **ii. Jerarquía de residuos**

Orden de prioridades (§6):

1. Prevención.
2. Preparación para la reutilización.
3. Reciclaje.
4. Otras formas de valorización.
5. Eliminación como última opción.

Se permite flexibilizar si un análisis de ciclo de vida demuestra otra opción ambientalmente preferible.

Esta jerarquía se aplica a los módulos FV al final de su vida útil, promoviendo reutilización (mercado de segunda mano) y reciclaje (vidrio, silicio, aluminio, CdTe) antes que su eliminación.

## **iii. Obligaciones de productores**

Las obligaciones de los productores relacionadas a los PFV son:

- Diseñar productos más duraderos, reparables y reciclables (§23).
- Evitar sustancias que dificulten el reciclaje o representen riesgos ambientales (§23[2]).
- Aceptar productos al final de su vida útil y garantizar su valorización (§25).
- Informar al consumidor sobre devolución, reciclaje y tratamiento (§26).
- Obligación de impulsar el eco-diseño, etiquetado claro y reducción de plásticos de un solo uso (§23a, §33; 2020).

En definitiva, los fabricantes deben garantizar reciclabilidad de módulos, facilitar desmontaje y reducir sustancias críticas (Pb, Cd, Se).

## **iv. Metas cuantitativas de reciclaje**

Las metas de reciclaje y reutilización se calculan sobre la base del peso total de los residuos generados:

- Reciclaje de residuos municipales: 55% (2025), 60% (2030), 65% (2035) (§14[1]).
- Residuos de construcción y demolición: mínimo 70% desde 2020 (§14[2]).

Aunque estas metas están pensadas en términos amplios, abarcan también a los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), ya que forman parte de los residuos municipales y comerciales regulados por esta ley marco.

#### v. **Medidas recientes (2020–2024)**

- Prioridad al uso de productos reparables y reutilizables en la contratación pública (§45, 2020).
- Inclusión de disposiciones para reducir plásticos de un solo uso (§33, 2020).
- Refuerzo de la trazabilidad en transporte transfronterizo de residuos, alineado con el Reglamento (CE) 1013/2006, de la Convención de Basilea (§28–30).

Este último punto garantiza que los paneles FV exportados como residuos deban declararse según su composición (Cd, Pb, Se, TeCd) y reciban tratamiento equivalente en destino.

En síntesis, la Ley KrWG establece los principios generales de la economía circular en Alemania, tales como la jerarquía de residuos, las obligaciones de los productores, las metas generales de reciclaje y la trazabilidad. Se configura como la “columna vertebral” del sistema de gestión de residuos, garantizando coherencia entre la política marco de economía circular y las normativas específicas que la desarrollan, entre las cuales destacan:

- **ElektroG (2015, reformado 2021/2022)**, que regula los RAEE y los paneles FV, fijando metas y responsabilidades de productores y distribuidores.
- **EAG-BehandV (2021)**, que fija protocolos técnicos de tratamiento de RAEE, con requisitos específicos para módulos FV (separación Si/no-Si, límites de Pb, Cd, Se, reciclaje de Al y CdTe).

De esta manera, la KrWG asegura que las disposiciones sectoriales, como la gestión de paneles FV, estén alineadas con los objetivos estratégicos de circularidad y con las metas de reciclaje obligatorias de la Unión Europea (UE).

### **6.6.1.2 Ley de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (ElektroG)**

La Elektro - und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) constituye la norma específica alemana que regula la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Fue promulgada inicialmente en 2005 para implementar la Directiva WEEE 2002/96/CE, y posteriormente reformada en 2015 (ElektroG2) con el fin de adecuarse a la Directiva WEEE 2012/19/UE, incorporando de manera explícita a los módulos fotovoltaicos (PFV) dentro de su ámbito de aplicación. La más reciente actualización, conocida como ElektroG3, entró en vigor el 1 de enero de 2022, introduciendo obligaciones adicionales para plataformas de comercio electrónico y reforzando el principio de responsabilidad extendida del productor (REP).

El alcance del ElektroG es amplio: se aplica a todos los fabricantes, importadores, distribuidores y comercializadores de aparatos eléctricos y electrónicos en Alemania, imponiendo obligaciones de registro, financiamiento, trazabilidad y tratamiento de residuos. En el caso particular de los paneles fotovoltaicos, la ElektroG constituye la norma clave que regula su gestión al final de la vida útil, fijando metas de reciclaje más estrictas que las metas generales establecidas por la KrWG, y estableciendo responsabilidades claras para los productores a lo largo de todo el ciclo de vida de los módulos.

Algunos de los puntos relevantes de la ley, enfocado en los residuos fotovoltaicos son (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG, 2022):

#### **i. Recolección de módulos fotovoltaicos**

La ElektroG establece que los módulos fotovoltaicos (PFV) deben recolectarse en contenedores específicos, clasificados dentro de la Categoría 6 de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE).

La Categoría 6 fue creada en la reforma de 2015 (ElektroG2), cuando Alemania incorporó expresamente a los módulos FV en la legislación RAEE. Su inclusión obedece a que los paneles contienen:

- Materiales de alto valor (vidrio, aluminio, silicio, plata, telurio de cadmio).
- Sustancias potencialmente peligrosas (plomo, cadmio, selenio).

El almacenamiento en contenedores especiales busca evitar daños estructurales, roturas y derrames durante la fase de acopio y transporte. Por ejemplo, la normativa alemana prohíbe compactar o fracturar módulos FV en el punto de recogida, ya que esto incrementa el riesgo de fugas de metales pesados y reduce la eficiencia de los procesos de reciclaje posteriores.

Además, esta separación contribuye a la trazabilidad, dado que los módulos FV se contabilizan como flujo independiente dentro de los reportes obligatorios que los productores deben presentar a la Stiftung EAR (fundación alemana encargada de administrar el registro nacional de productores de aparatos eléctricos y electrónicos) y a la Agencia Federal de Medio Ambiente de Alemania (Umweltbundesamt). De esta forma, se garantiza que los residuos fotovoltaicos no se diluyan estadísticamente dentro del conjunto de RAEE, lo que facilita la evaluación del cumplimiento de las metas específicas de valorización y reciclaje.

## **ii. Obligaciones según modalidad de negocio (B2C y B2B)**

El ElektroG diferencia entre Business to Consumer (B2C) y Business to Business (B2B) porque la logística y los volúmenes de los residuos de módulos FV son distintos:

- **B2C (hogares y pequeñas instalaciones)**

- El ciudadano puede devolver módulos FV de manera gratuita en los puntos municipales de recogida (örE) o directamente al distribuidor.
- Los productores están obligados a asumir todos los costos de transporte y tratamiento, sin trasladarlos al consumidor.
- Los distribuidores con más de 400 m<sup>2</sup> de superficie de ventas deben aceptar módulos pequeños (<25 cm) sin obligación de compra, y si comercializan módulos FV deben aceptar los antiguos en condiciones de “uno por uno” (al vender un módulo nuevo, aceptar uno usado).
- Garantiza la accesibilidad de los usuarios domésticos al sistema formal de reciclaje.

- **B2B (instalaciones comerciales o industriales)**

- Se basa en contratos privados entre productores y usuarios profesionales (empresas, plantas solares, instaladores).

- El productor tiene la obligación de ofrecer una solución de recogida y reciclaje al cliente en el contrato de compraventa, incluso si se pacta que el cliente asuma el costo.
- Se asegura que grandes volúmenes de módulos FV industriales tengan trazabilidad, evitando que terminen en vías informales o exportaciones ilegales.

Esta diferenciación B2C/B2B permite que tanto usuarios domésticos como empresas tengan garantizado un canal de gestión ambientalmente seguro para los módulos FV.

### **iii. Mecanismo de financiamiento y responsabilidad de costos**

El financiamiento de la gestión de módulos FV se apoya en un sistema mixto que combina pago inmediato y garantía a futuro:

- **Nivel 1 – Pay-as-you-go:**
  - El productor financia directamente la recogida, transporte y tratamiento de los módulos FV retirados en el corto plazo.
  - Los costos se calculan en función de la cantidad efectivamente recogida y reciclada cada año.
- **Nivel 2 – Garantía financiera:**
  - Los productores deben presentar una garantía anual ante la Stiftung EAR (depósito, seguro, aval bancario o adhesión a un sistema colectivo).
  - Esta garantía asegura que los módulos puestos en el mercado hoy tendrán financiamiento para su reciclaje dentro de 20–30 años, cuando alcancen el fin de su vida útil.
  - Protege al sistema en caso de quiebra o salida de un fabricante del mercado, evitando que los costos recaigan en el Estado o en los consumidores.

Esto hace de ElektroG un sistema financieramente sostenible, adaptado al largo ciclo de vida de los módulos FV.

### **iv. Obligaciones financieras y de trazabilidad de los productores**

Los productores e importadores de módulos FV tienen obligaciones financieras y de control muy estrictas (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG, 2022):

- Registro en Fundación para el Registro de Residuos de Aparatos Eléctricos (Stiftung EAR), §6: ningún productor puede comercializar módulos FV sin estar previamente registrado.
- Garantía financiera (§7): obligación de presentar anualmente una garantía que cubra los futuros costos de reciclaje.
- Responsabilidad de retirada (§16): los productores están obligados a retirar, a petición de los puntos municipales de recogida (örE) o distribuidores, los módulos FV recogidos y transportarlos a plantas certificadas.
- Reportes de trazabilidad (§27–30): productores, distribuidores y plantas deben reportar cantidades de módulos FV puestos en el mercado, recogidos, reutilizados, reciclados y valorizados.
- Separación de flujos FV: el ElektroG exige que los módulos FV se registren y reporten como categoría independiente dentro de los RAEE, garantizando transparencia estadística y evitando que se diluyan en otras categorías.

En conjunto, estas disposiciones crean un sistema cerrado y trazable en el que cada módulo FV puesto en el mercado alemán está asociado a un productor responsable hasta su reciclaje final.

#### **v. Metas de reciclaje y valorización**

El artículo 22 de la Ley ElektroG, en coherencia con la Directiva 2012/19/UE (WEEE), establece metas cuantitativas específicas de reciclaje y valorización para los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. En el caso de los módulos fotovoltaicos, las metas son particularmente exigentes debido a su alto contenido en materiales recuperables:

- **≥75% de valorización total**
  - Incluye tanto el reciclaje de materiales como otras formas de valorización.
  - Busca maximizar el aprovechamiento de recursos y minimizar la disposición final.

- **≥50% de preparación para reciclaje**
  - Se refiere a la recuperación de materiales secundarios como vidrio, aluminio, silicio, plata y telurio de cadmio.
  - Estos materiales pueden reintroducirse en cadenas industriales.

#### **vi. Multas y sanciones**

El artículo 45 de la Ley ElektroG establece un régimen de sanciones económicas significativas para asegurar el cumplimiento de la ley. Las infracciones aplicables a los productores e importadores de módulos fotovoltaicos incluyen:

- **Multas de hasta 100.000 € por:**
  - Comercializar módulos FV sin estar registrados en la Stiftung EAR.
  - No presentar garantías financieras para cubrir la gestión futura de residuos.
  - No organizar la recogida y retirada de módulos FV al final de la vida útil.
  - No cumplir con las obligaciones de reporte de cantidades puestas en mercado y gestionadas.
  
- **Multas adicionales (hasta 10.000 €) por incumplimientos operativos, como:**
  - No marcar los módulos con el símbolo del contenedor tachado, que indica su carácter de RAEE.
  - Obstaculizar el acceso gratuito de los consumidores a los sistemas de devolución.

El alto monto de las multas refuerza la importancia de mantener un sistema financieramente sólido y ambientalmente seguro.

#### **6.6.1.3 Reglamento técnico EAG-BehandV**

La Elektro - und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung (EAG-BehandV), está vigente desde 2021, complementa la Ley ElektroG detallando los requisitos técnicos que deben cumplir las plantas autorizadas de tratamiento de RAEE. Mientras que la ElektroG define las

obligaciones generales de productores e importadores, la EAG-BehandV establece los protocolos concretos de manejo, separación y control de contaminantes.

En el caso de los módulos fotovoltaicos (PFV), el reglamento introduce exigencias específicas que buscan garantizar un tratamiento ambientalmente seguro y alineado con los principios de economía circular (EAG-BehandV, 2021):

### **I. Separación obligatoria de tecnologías**

- Los módulos de silicio cristalino (Si) deben gestionarse de forma diferenciada respecto de los módulos de película delgada (no-Si, como CdTe o CIGS).
- Esta separación es clave porque los procesos de reciclaje y los riesgos ambientales difieren:
  - En módulos de silicio cristalino predomina la recuperación de vidrio, aluminio y silicio.
  - En módulos de CdTe o CIGS, el foco está en la contención de metales pesados y la recuperación de telurio y cobre.

### **II. Límites de metales pesados en fracciones recicladas**

El §10 de la EAG-BehandV establece límites diferenciados de concentración de plomo, cadmio y selenio en las fracciones resultantes del tratamiento de módulos fotovoltaicos, con el fin de garantizar la seguridad ambiental y la calidad de los materiales recuperados:

- **Módulos de silicio cristalino (Si)**
  - En la fracción de vidrio:
    - **Pb  $\leq$  100 mg/kg**
    - **Cd y Se  $\leq$  1 mg/kg**
  - En las demás fracciones destinadas a valorización:
    - **Pb  $\leq$  200 mg/kg**
    - **Cd y Se  $\leq$  1 mg/kg**

- **Módulos no-Si (CdTe, CIGS y otras tecnologías de película delgada)**
  - En la fracción de vidrio y en las fracciones para valorización:
    - $Pb \leq 10 \text{ mg/kg}$
    - $Cd \text{ y } Se \leq 1 \text{ mg/kg}$
  - Excepción: este límite no se aplica a la fracción semiconductor, que debe tratarse mediante procesos específicos.

En síntesis, la norma exige que las fracciones recicladas cumplan con valores máximos estrictos de contaminantes, lo que obliga a procesos de separación y depuración de alta precisión antes de reincorporar los materiales como materias primas secundarias.

### **III. Recuperación de materiales críticos (§10)**

El reglamento (§10) exige la recuperación selectiva de materiales estratégicos, por ejemplo:

- Aluminio (de marcos y estructuras).
- Teluro de cadmio (CdTe), presente en módulos de película delgada, considerado un recurso escaso y valioso.
- Vidrio y silicio, que constituyen hasta el 90% del peso de los módulos cristalinos.

### **IV. Sistemas de autocontrol y planes correctivos (§12)**

- Las plantas de tratamiento deben implementar sistemas de autocontrol continuo, documentando procesos, volúmenes y resultados de recuperación.
- En caso de incumplimiento de los límites de metales pesados o de fallos en los procesos, deben establecerse planes correctivos inmediatos y reportar a la autoridad competente (Agencia Federal del Medio Ambiente).
- Esto refuerza la trazabilidad y transparencia del flujo de residuos FV.

En síntesis, la ElektroG se rige como la pieza normativa central que permite dar cumplimiento en Alemania a los principios de la economía circular en relación con los residuos de paneles solares, articulándose con la KrWG como ley marco y con la EAG-BehandV como reglamento técnico de tratamiento.

## 6.6.2 Francia

La regulación francesa en materia de economía circular constituye uno de los marcos más avanzados de Europa, integrando de manera explícita a los paneles fotovoltaicos (PFV) dentro de la Responsabilidad Ampliada del Productor (REP). A partir de la Ley Anti-Residuos para una Economía (Ley N.º 2020-105, 2020) y su desarrollo reglamentario en el Código Ambiental (Artículo L541-10, 2024), Francia ha establecido una columna vertebral normativa que combina obligaciones de trazabilidad, financiamiento colectivo y metas de valorización con un régimen sancionador estricto. En este contexto, los PFV fueron clasificados como una categoría independiente de equipos eléctricos y electrónicos, sujetos a obligaciones específicas de recolección, reciclaje y ecodiseño, cuya gestión está encomendada al eco-organismo SOREN (Journal officiel de la République française n°304, 2021). Este capítulo desarrolla tanto la estructura general de la política francesa de economía circular como las disposiciones particulares aplicables a los residuos fotovoltaicos, destacando la importancia de este modelo como referente internacional en la transición hacia una economía más sostenible.

Para comprender en profundidad el eje normativo de la economía circular en Francia, resulta necesario abordar los tres pilares que la sustentan: la columna vertebral que define el principio de responsabilidad ampliada del productor, la estructura operativa que detalla su aplicación mediante decretos, y el manual operativo que establece las obligaciones concretas a través de los presupuestos de los eco-organismos.

### 6.6.2.1 Principio de Responsabilidad Ampliada del Productor (REP)

La estructura de la columna vertical de toda la política de economía circular en Francia está constituida por el siguiente marco legal, cuyos alcances aplica a múltiples sectores (envases, textiles, muebles, neumáticos, aparatos eléctricos y electrónicos, etc.):

- La Ley AGECE (Ley N.º 2020-105, 2020) reforzó el principio de REP en Francia, aplicando el concepto “quien contamina paga”.
- Artículo L. 541-10, del Código Ambiental: obliga a los productores, importadores o distribuidores a organizar y financiar la gestión de los residuos de los productos que ponen en el mercado (Artículo L541-10, 2024).

La estructura operativa respecto al principio REP lo sustenta el siguiente el Decreto N.º 2020-1455 tras la Ley AGECE, la que contiene (Decreto N.º 2020-1455, 2020):

- Condiciones de aprobación de eco-organismos (arts. R. 541-86 a R. 541-89, Código del Medio Ambiente).
- Reglas de gobernanza (comités de partes interesadas, participación de ONG y autoridades locales).
- Procedimientos de contratos tipo con municipios y operadores de residuos (arts. R. 541-102 a R. 541-105, Código del Medio Ambiente).
- Fondos financieros para reparación y reutilización (arts. L. 541-10-4 y L. 541-10-5, Código del Medio Ambiente).

Finalmente, el manual operativo de los eco-organismos, como el SOREN (para PFV), lo sustenta la Orden Ministerial de 27 de octubre de 2021, el que contiene (Journal officiel de la République française, 2021):

- Metas de recogida y valorización (PFV: 87% valorización, 82% reciclaje).
- Reglas de ecodiseño (art. 2.1: bonificaciones y penalizaciones en eco-contribuciones según reparabilidad, reciclabilidad, sustancias peligrosas, uso de material reciclado).
- Trazabilidad (art. 3.10: caracterización anual de flujos de RAEE).
- Estudios obligatorios sobre materias críticas en paneles FV (art. 3.11).
- Fondos para reparación, reutilización y reemplazo.

A partir de esta columna vertebral, resulta pertinente analizar en detalle las disposiciones específicas que afectan directamente a los paneles fotovoltaicos (PFV), en aspectos clave como trazabilidad, financiamiento, régimen sancionatorio y el rol de los eco-organismos autorizados, lo que permitirá comprender de manera integral el alcance y los desafíos de la regulación francesa en este sector.

#### **6.6.2.2 Inclusión de los paneles fotovoltaicos (PFV) en la REP**

Los paneles fotovoltaicos fueron incluidos formalmente a la REP en el año 2021, con entrada en vigor en enero de 2022 y los artículos que le dan sustento son:

- Artículo R. 543-172, Código Medio Ambiental (CMA): clasifica los paneles fotovoltaicos como la categoría 7 de los Equipos Eléctricos y Electrónicos (EEE) (Artículos R543-172 a R543-206, 2021).
- Artículo R. 543-174, Código Medio Ambiental (CMA): define qué es un productor (fabricante, importador o vendedor online en Francia) y lo obliga a declararse en el registro nacional (Artículos R543-172 a R543-206, 2021).

### 6.6.2.3 Metas de recogida y reciclaje

En cuanto a las metas establecidas por el marco normativo, cabe destacar que se encuentran entre las más exigentes de Europa, y se resumen en las siguientes:

- Artículo R. 543-172-2, Código Medio Ambiental (CMA): fija la tasa mínima de recogida nacional que deben cumplir los productores o los eco-organismos dentro del régimen de Responsabilidad Ampliada del Productor (Artículos R543-172 a R543-206, 2021):
  - 65% del peso medio de EEE puestos en el mercado en los 3 años previos, o
  - 85% de los RAEE generados.
- Decreto de 27 de octubre de 2021, artículo 3.2 (Journal officiel de la République française, 2021): es el manual operativo que fija las obligaciones mínimas que deben cumplir los eco-organismos aprobados dentro de la Responsabilidad Ampliada del Productor (REP):
  - Valorización mínima de **PFV**: 87%.
  - Reciclaje y preparación para reutilización (**PFV**): 82%.

### 6.6.2.4 Ecodiseño y sustancias peligrosas

Dado que Francia no solo importa, sino que también fabrica y ensambla equipos eléctricos y electrónicos, incluida tecnología vinculada a los paneles fotovoltaicos, su marco regulatorio incorpora exigencias específicas de ecodiseño y trazabilidad en origen. En esta línea, los siguientes artículos permiten preparar a los gestores de residuos para un tratamiento seguro (Artículos R543-172 a R543-206, 2021):

- Artículo R. 543-176, CMA: exige diseñar los EEE de forma que faciliten desmontaje, reutilización y reciclaje.
- Artículo R. 543-177, CMA: obliga a marcar todos los equipos con identificación del productor.
- Artículo R. 543-178, CMA: los productores deben entregar información técnica sobre materiales y sustancias peligrosas en los equipos (ej. cadmio, plomo, selenio en paneles).

#### **6.6.2.5 Trazabilidad**

En el marco regulatorio francés, la trazabilidad de los residuos comienza desde la comercialización, a través del registro obligatorio de productores, y se mantiene a lo largo de toda la cadena hasta llegar al reciclaje y valorización final. Este principio se sustenta en disposiciones específicas como:

- Artículo R. 543-174, CMA: todo productor debe registrarse y declarar cantidades puestas en el mercado (Artículos R543-172 a R543-206, 2021).
- Decreto de 27 de octubre de 2021, artículo 3.10: los eco-organismos deben realizar caracterización anual de flujos, incluyendo PFV, para medir materiales recuperados y peligrosos (Journal officiel de la République française, 2021).
- Decreto de 27 de octubre de 2021, artículo 3.11: obliga a estudios sobre materias críticas en células FV, como el silicio, indio, telurio y la plata (Journal officiel de la République française, 2021).

#### **6.6.2.6 Financiamiento**

El marco francés establece un sistema financiero sólido y obligatorio para garantizar la gestión de los residuos en el marco de la REP. Este se articula a través de las eco-contribuciones que deben pagar los productores, art. L. 541-10-2 (Artículo L541-10, 2024), las cuales pueden modularse según criterios de ecodiseño (Artículo R.541-99, 2021), y se complementa con la creación de fondos específicos destinados a la reparación y al reemplazo y reutilización (Artículo L541-10, 2024). En el caso de los paneles fotovoltaicos, la Orden de 4 de marzo 2022 reforzó estas obligaciones al exigir a SOREN la definición de criterios de financiamiento de los fondos

de reemplazo antes del 31 de mayo de 2022 (Journal officiel de la République française n°59, 2022).

#### **6.6.2.7 Régimen sancionatorio**

Respecto a las sanciones, el marco francés se caracteriza por su enfoque coercitivo, estableciendo multas y sanciones significativas para garantizar el cumplimiento. Algunos puntos por destacar respecto a las multas y sanciones son:

- Artículo L. 541-9-6 CMA: indica que incumplir la REP puede acarrear sanciones.
- Multas (Decreto N.º 2020-1455, 2020):
  - Hasta 7.500 € para personas físicas.
  - Hasta 45.000 € para personas jurídicas.
- Artículo L. 541-10-9 CMA: se puede ordenar la suspensión de comercialización de los productos si no cumplen la REP.
- Arts. R. 541-86 a R. 541-89 CMA: un eco-organismo puede perder su autorización oficial (agrément) si no cumple metas de recogida, reciclaje o trazabilidad.

#### **6.6.2.8 Eco-organismo SOREN**

SOREN es el eco-organismo autorizado en Francia para la categoría 7 de los Equipos Eléctricos y Electrónicos (EEE), correspondiente a los paneles fotovoltaicos (PFV). Su reconocimiento oficial se produjo mediante la Orden de 22 de diciembre 2021 (Journal officiel de la République française n°304, 2021), que otorgó a la entidad su aprobación inicial, mientras que la Orden de 4 de marzo de 2022 extendió dicha autorización hasta el 31 de diciembre de 2027 y le impuso la obligación de presentar criterios de financiamiento para los fondos de reemplazo y reutilización.

Las funciones específicas de SOREN están definidas en las especificaciones de las eco-organizaciones (Journal officiel de la République française, 2021), el cual establece:

- Alcanzar metas de recolección, reciclaje y valorización de los PFV: 87% valorización y 82% reciclaje (arts. 3.1–3.2).

- Realizar una caracterización anual de flujos, incluyendo paneles fotovoltaicos (art. 3.10).
- Elaborar estudios sobre materias críticas presentes en las células fotovoltaicas, como silicio, indio, telurio y plata (art. 3.11).
- Administrar los fondos de reparación y de reemplazo/reutilización (arts. 4–5).
- Cumplir con las obligaciones de trazabilidad y reporte ante las autoridades competentes (art. 7).

Con este marco normativo, SOREN se consolida como el actor central del sistema REP francés en materia de paneles fotovoltaicos, garantizando tanto el cumplimiento de metas ambientales como la correcta gestión financiera y técnica del sector.

En síntesis, la inclusión de los paneles fotovoltaicos como categoría independiente dentro de la REP y la creación de un eco-organismo especializado como SOREN reflejan la madurez del sistema francés y lo convierten en un referente internacional.

### **6.6.3 Japón**

Japón representa un caso de gran interés en el análisis comparativo, debido a que combina una proyección significativa de residuos fotovoltaicos, derivada de la masiva instalación de sistemas solares tras la implementación del sistema de tarifa fija (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2021) en 2012, con un enfoque normativo anticipatorio. La columna vertebral de su régimen de gestión de residuos está dada por la Ley de Gestión de Residuos y de Limpieza Pública (Ley N.º137, 1970), categorías amplias como residuos municipales, residuos industriales y residuos de manejo especial, definiendo responsabilidades de generadores, empresas y gobiernos locales. A esta ley se suman lineamientos operativos específicos como las Guía para la provisión de información sobre el tratamiento adecuado de módulos solares usados elaboradas por la Japan Photovoltaic Energy Association (Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica, 2017), las Guía para la provisión de información sobre el tratamiento adecuado de módulos solares del Ministerio de Medio Ambiente (2021, 2023), y la más reciente Guía para la promoción del reciclaje de instalaciones de energía solar fotovoltaica ,3ª ed. (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024). Este entramado normativo, que integra la cooperación público–privada y promueve innovación tecnológica en reciclaje de silicio,

vidrio y metales, configura un modelo alternativo al europeo, centrado en la REP obligatoria, y aporta insumos valiosos para el debate regulatorio en Chile, donde aún persisten vacíos legales frente a los desechos fotovoltaicos.

Para comprender en mayor profundidad cómo Japón aborda la economía circular y el reciclaje de paneles fotovoltaicos, los apartados siguientes presentan una visión general de su funcionamiento, así como de sus principales características.

### **6.6.3.1 Alcances del marco normativo**

La Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970) establece la base legal para la gestión de residuos en Japón. Esta norma regula la prevención, clasificación, recolección, transporte, reciclaje y disposición final de residuos municipales e industriales, incluyendo obligaciones diferenciadas para generadores, empresas y gobiernos locales.

Es relevante subrayar que la Ley N.º137 no menciona explícitamente a los paneles fotovoltaicos (PFV), dado que en 1970 esta tecnología aún no estaba difundida. En la práctica, los módulos solares en desuso se clasifican como residuos industriales, quedando sujetos a las disposiciones generales de trazabilidad y manejo seguro.

La gestión específica de PFV ha sido desarrollada posteriormente mediante instrumentos complementarios:

- **Guías de la Japan Photovoltaic Energy Association (JPEA, 2017)**, que obligan a los fabricantes a entregar información sobre sustancias peligrosas como plomo, cadmio, arsénico y selenio.
- **Guías del Ministerio de Medio Ambiente (2021, 2023 y 2025)**, que fijan criterios técnicos para reuso, reciclaje y disposición final, incluyendo protocolos de pruebas de desempeño y requisitos de embalaje.

De este modo, Japón articula un sistema en el que la Ley N.º137 funciona como columna vertebral general, mientras que los PFV son regulados mediante guías específicas, en un esquema de regulación flexible y anticipatoria.

### **6.6.3.2 El papel de NEDO**

La New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) se estableció en 1980 como una corporación administrativa especial bajo supervisión del entonces Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI, hoy METI). Su creación se sustentó en el Special Account Law for Petroleum and Energy Demand and Supply Structure Improvement (1980), una ley diseñada tras las crisis del petróleo de 1973, cuyo objetivo era impulsar el desarrollo de fuentes de energía alternativas y fortalecer la seguridad energética de Japón (Ley N.º 145, 2002).

Originalmente, la misión de NEDO se centraba en la promoción de nuevas energías y la mejora de la eficiencia energética. Con la promulgación de la Basic Energy Law (1997) y los sucesivos Planes Estratégicos de Energía, documentos oficiales que orientan la política energética japonesa, se amplió su mandato hacia las energías renovables y las tecnologías de economía circular.

En este contexto normativo, los paneles fotovoltaicos (PFV) se incorporaron formalmente a la agenda de NEDO a través del Ley Básica de Política Energética (2002) y de los Planes Estratégicos de Energía posteriores, que reconocieron a la energía solar como pilar central de la matriz energética de Japón. Desde 2014, con la entrada en vigor del FIT (Feed-in Tariff) y la masiva instalación de sistemas solares, NEDO inició proyectos específicos de I+D en reciclaje de módulos fotovoltaicos, en línea con la Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970) y las guías técnicas emitidas por el Ministerio de Medio Ambiente.

De este modo, NEDO pasó de ser una agencia centrada en la seguridad energética a convertirse en un actor clave para la economía circular de los PFV, financiando investigaciones sobre recuperación de vidrio, silicio y metales estratégicos, y apoyando la implementación de guías ministeriales para la gestión de estos residuos.

### **6.6.3.3 Financiamiento**

A diferencia de Europa, donde predominan los esquemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) con fondos colectivos gestionados por eco-organismos (como ocurre en Francia con SOREN), Japón no dispone de un fondo REP específico para los paneles

fotovoltaicos (PFV). En su lugar, el financiamiento se estructura en un modelo descentralizado, basado en tres pilares principales:

### **I. Responsabilidad del generador**

Conforme a la *Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970)*, los residuos derivados de la actividad empresarial deben ser gestionados directamente por el generador. En el caso de los PFV, esto implica que los propietarios y empresas instaladoras deben asumir los costos asociados a la recolección, transporte y disposición final de los módulos en desuso. Este principio traslada la carga financiera al responsable directo de la generación del residuo, sin mecanismos de redistribución colectiva como en los modelos europeos.

### **II. Apoyo estatal a la innovación**

El Ministerio de Medio Ambiente (MOE) y la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) desempeñan un rol activo en el financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo. Desde 2014, NEDO impulsa tecnologías de reciclaje orientadas a la recuperación de vidrio, silicio y metales estratégicos, en el marco de programas de economía circular para energías renovables. Estos fondos no están destinados a costear la operación cotidiana de la gestión de residuos, sino a generar capacidades tecnológicas y modelos replicables que faciliten la viabilidad económica del reciclaje de PFV en el futuro (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024).

### **III. Gobiernos locales**

Los municipios y prefecturas tienen la responsabilidad de implementar sistemas de recolección diferenciada, fiscalizar a los gestores y en algunos casos cofinanciar infraestructuras de tratamiento. Asimismo, son quienes aplican las guías técnicas emitidas por el MOE y la JPEA, garantizando que los módulos desechados sean derivados a instalaciones autorizadas (Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica, 2017).

En síntesis, el modelo japonés de financiamiento se basa en el principio de “quien contamina paga” para el generador, complementado con inversión pública en innovación y el apoyo operativo de los gobiernos locales. Esta combinación asegura trazabilidad y desarrollo

tecnológico, aunque aún carece de un mecanismo de redistribución financiera similar a la REP europea.

#### 6.6.3.4 Metas

En Japón no existen metas cuantitativas específicas aplicables a los paneles fotovoltaicos (PFV). En lugar de fijar porcentajes de cumplimiento, el marco japonés se organiza en torno a una jerarquía de prioridades en la gestión de residuos, en línea con la *Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970)* y con las guías ministeriales recientes:

1. **Reúso:** se privilegia la extensión de la vida útil de los módulos siempre que mantengan capacidad de generación eléctrica. Las *Guidelines for the Promotion of Proper Reuse of Solar Modules* (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024) establecen criterios técnicos de inspección (curvas I-V, pruebas de electroluminiscencia, inspección visual) para determinar si un módulo puede reincorporarse al mercado secundario.
2. **Reciclaje:** cuando los módulos no cumplen con condiciones de reuso, se fomenta su procesamiento para recuperar materiales valiosos como vidrio, silicio y metales. Las *Guidelines for Promoting Recycling of Solar Power Facilities* (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024) describen flujos de separación y procesos mecánicos y químicos para maximizar la valorización.
3. **Disposición final en rellenos de seguridad:** los módulos dañados o no reciclables deben ser enviados a vertederos de tipo “controlado” o “gestionado”, en concordancia con la clasificación de residuos industriales que realiza la *Waste Management Law (Ley N.º137, 1970)*.

#### 6.6.3.5 Trazabilidad

La trazabilidad de los residuos constituye un eje central del sistema japonés de gestión, establecido originalmente en la *Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970)*. Esta ley regula el manejo de los residuos industriales, categoría en la cual se incluyen los paneles fotovoltaicos (PFV) al término de su vida útil, aunque no son mencionados de forma explícita en el texto legal. En la práctica, los módulos desechados se tratan como residuos

industriales sujetos a las obligaciones generales de control, transporte, reciclaje y disposición final.

El instrumento operativo de esta trazabilidad es el manifiesto electrónico de residuos (Electronic Manifest System), que obliga a generadores, transportistas y gestores finales a registrar cada etapa del movimiento de residuos en una plataforma digital. Este sistema permite a los gobiernos locales y al Ministerio de Medio Ambiente supervisar en tiempo real la gestión y prevenir la disposición ilegal (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024).

En el caso específico de los PFV, la trazabilidad se ha reforzado mediante guías sectoriales:

- **Guías de la Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica (JPEA), 2017:** la Japan Photovoltaic Energy Association exige a los fabricantes proveer información sobre sustancias peligrosas (plomo, cadmio, arsénico y selenio), publicada en plataformas web. Este mecanismo facilita que gestores y municipios tomen decisiones informadas sobre la disposición de módulos.
- **Guías del Ministerio de Medio Ambiente de Japón (MOE); 2021, 2023 y 2025:** el Ministerio de Medio Ambiente complementó este marco al requerir que propietarios y gestores documenten la condición de los módulos (apto para reúso, reciclaje o disposición final), junto con protocolos de pruebas técnicas (curvas I-V, electroluminiscencia, inspección visual) y requisitos de embalaje.

En síntesis, aunque los PFV no están explicitados en la Ley N.º 137 de 1970, se les aplica el régimen de residuos industriales y se complementa con guías técnicas sectoriales. Este doble esquema refuerza la trazabilidad y permite garantizar la transparencia, la seguridad ambiental y el cumplimiento de compromisos internacionales como el Convenio de Basilea.

#### **6.6.3.6 Estudios tecnológicos**

Japón se ha posicionado como uno de los países pioneros en el desarrollo de tecnologías de reciclaje para paneles fotovoltaicos (PFV), gracias a la acción coordinada de la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), el Ministerio de Medio Ambiente (MOE) y la industria fotovoltaica representada por la Japan Photovoltaic Energy

Association (JPEA). Estos actores han impulsado proyectos de investigación aplicada y programas piloto que buscan maximizar la recuperación de materiales estratégicos y reducir los costos de tratamiento.

Entre los principales avances tecnológicos se destacan (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024):

### **I. Recuperación de vidrio de alta pureza**

- El vidrio representa aproximadamente el 70–75% del peso de un módulo FV.
- NEDO ha financiado el desarrollo de tecnologías que permiten recuperar **más del 90% del vidrio**, con un nivel de pureza suficiente para reincorporarlo en cadenas productivas industriales.

### **II. Procesos de separación de silicio y metales**

- Se han implementado métodos mecánicos, térmicos y químicos para separar las láminas de silicio y recuperar metales como **plata, indio y galio**, de alto valor estratégico para la industria electrónica.
- Las guías del MOE (2025) presentan flujos de procesos que incluyen trituración controlada, separación por densidad, tratamiento térmico y lixiviación selectiva.

### **III. Innovaciones en técnicas de desmontaje**

- Se han ensayado tecnologías como el uso de **hot knives** (cuchillas térmicas), **procesos de pirólisis** y técnicas de separación por abrasión (*scratching*), que facilitan el deslaminado de los módulos y reducen la energía requerida en comparación con procesos convencionales.

### **IV. Optimización de costos de reciclaje**

- Los proyectos de NEDO han puesto especial énfasis en reducir el costo unitario de reciclaje, con la meta de hacerlo competitivo frente a la disposición en vertederos.
- Se busca que las tecnologías desarrolladas puedan ser escaladas a plantas comerciales y replicadas en otras prefecturas.

## **V. Proyectos piloto en Fukushima**

- En el marco del Fukushima Innovation Coast Framework, se han desarrollado plantas experimentales de reciclaje de PFV que integran los procesos de recuperación de vidrio y silicio con proyectos de energía renovable e hidrógeno verde, vinculando la reconstrucción regional con la economía circular (Ministerio de Economía, 2025).

En conclusión, los estudios tecnológicos japoneses apuntan no solo a la recuperación de materiales de alto valor sino también a la viabilidad económica y ambiental del reciclaje fotovoltaico, reforzando el enfoque del país en la innovación como herramienta para anticipar el aumento proyectado de residuos PFV en la década de 2030.

### **6.6.3.7 Articulación entre instituciones**

Uno de los rasgos distintivos del modelo japonés de gestión de residuos fotovoltaicos (PFV) es la coordinación multinivel entre organismos públicos, asociaciones industriales y entidades de investigación. En ausencia de un esquema de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) obligatorio para los PFV, la efectividad del sistema depende en gran medida de la interacción entre instituciones, cada una con un rol definido.

#### **I. Ministerio de Medio Ambiente (MOE)**

- Es el organismo rector de la política de gestión de residuos y de economía circular.
- Ha emitido sucesivas guías para el reuso y reciclaje de módulos fotovoltaicos (2021, 2023 y 2025), donde se establecen protocolos técnicos para la clasificación, pruebas de funcionamiento, transporte, reciclaje y disposición final.
- Además, supervisa el cumplimiento de la *Waste Management and Public Cleansing Law (Ley N.º137, 1970)* mediante el sistema de manifiestos electrónicos, garantizando la trazabilidad de los residuos.

#### **II. Gobiernos locales (prefecturas y municipios)**

- Son responsables de autorizar a los operadores de transporte, almacenamiento y tratamiento de residuos industriales, incluyendo los PFV.

- Implementan a nivel territorial las guías técnicas emitidas por el MOE y realizan la fiscalización de gestores y generadores.
- En muchos casos, proveen infraestructura básica de recolección y actúan como enlace con la ciudadanía para prevenir el abandono de módulos.

### **III. Japan Photovoltaic Energy Association (JPEA)**

- Representa al sector industrial fotovoltaico y ha elaborado guías técnicas específicas, como las *Guidelines for Proper Treatment Information of Used Solar Modules* (Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica, 2017), que establecen la obligación de informar sobre la presencia de sustancias peligrosas en los módulos.
- Su papel es crucial en la provisión de información estandarizada a los gestores y en la promoción del ecodiseño de nuevos paneles.

### **IV. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)**

- Se encarga de financiar y coordinar proyectos de investigación aplicada en reciclaje de PFV, con énfasis en la recuperación de vidrio, silicio y metales estratégicos.
- Su trabajo permite vincular la política pública con la innovación tecnológica y fortalecer la viabilidad económica de la economía circular.

### **V. Sector privado y empresas de reciclaje**

- Participan en proyectos piloto y en la implementación de tecnologías desarrolladas por NEDO y JPEA.
- En algunos casos, colaboran con gobiernos locales para proveer servicios de reciclaje y reúso, en particular en áreas afectadas por desastres, como Fukushima (Ministerio de Economía, 2025).

En conjunto, esta articulación institucional permite que Japón compense la ausencia de un sistema REP formal con un entramado de cooperación público–privada, sustentado en guías técnicas, innovación tecnológica y fiscalización local. Este modelo muestra cómo la coordinación entre ministerios, gobiernos locales, asociaciones industriales y agencias de innovación puede constituir una alternativa eficaz para la gestión anticipada de los residuos fotovoltaicos.

### 6.6.3.8 Inversión público-privada

El modelo japonés de gestión de residuos fotovoltaicos se sustenta en una estrecha cooperación entre el sector público y el privado. En ausencia de un fondo REP colectivo como en Europa, Japón ha optado por impulsar un esquema en el que el Estado asume un rol catalizador en la creación de marcos normativos y en el financiamiento de investigación, mientras que la industria participa en la implementación práctica y en la escalabilidad de las soluciones tecnológicas.

El Ministerio de Medio Ambiente (MOE) ha tenido un papel central en este proceso, al establecer lineamientos específicos para el reúso, reciclaje y disposición de los módulos fotovoltaicos en las guías publicadas en 2021, 2023 y 2025. Estas guías, si bien no son legalmente vinculantes, fijan estándares técnicos que orientan la inversión privada en infraestructura y aseguran la coherencia de las prácticas a nivel nacional.

En paralelo, la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ha financiado desde 2014 una serie de proyectos piloto orientados a perfeccionar tecnologías de reciclaje de módulos solares. Entre sus principales logros se encuentra el desarrollo de procesos para la recuperación de vidrio con una tasa de pureza superior al 90%, la extracción de silicio reutilizable y la separación de metales estratégicos como plata, indio y galio. Estos proyectos reducen los riesgos tecnológicos para las empresas privadas, al ofrecer soluciones probadas y con respaldo estatal (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024).

La participación empresarial se canaliza principalmente a través de la Japan Photovoltaic Energy Association (JPEA) y de compañías del sector de reciclaje y manufactura, que aplican las tecnologías desarrolladas en el marco de los programas públicos. La JPEA, por su parte, complementa este esquema proveyendo información sobre la composición química de los módulos, aspecto que facilita la trazabilidad y reduce los costos asociados a la gestión de sustancias peligrosas (Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2024).

Un ejemplo emblemático de esta articulación es el Fukushima Innovation Coast Framework, iniciativa que combina la reconstrucción regional con el desarrollo de la economía circular. En este proyecto, el gobierno nacional, los gobiernos locales y empresas privadas han establecido clústeres de innovación que incluyen plantas piloto para el reciclaje de paneles

fotovoltaicos y proyectos paralelos de producción de hidrógeno verde (Ministerio de Economía, 2025). La iniciativa no solo ha permitido validar nuevas tecnologías, sino que además ha generado inversión privada y empleo en una región severamente afectada por el accidente nuclear de 2011.

En conjunto, la inversión público–privada en Japón ha posibilitado la creación de un ecosistema en el que las políticas públicas y la innovación industrial avanzan de manera complementaria. El financiamiento estatal se orienta a reducir la incertidumbre tecnológica y a sentar las bases normativas, mientras que la industria aporta capacidad de ejecución, escalabilidad y acceso a mercados. Este modelo ha demostrado ser eficaz para anticipar el aumento proyectado de residuos fotovoltaicos y constituye una alternativa relevante frente a los esquemas europeos basados en fondos REP obligatorios.

#### **6.6.4 Benchmarking internacional**

Con el objetivo de identificar y sistematizar las principales experiencias internacionales en materia de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos (PFV), se elaboró un benchmarking normativo y técnico, cuyo desarrollo se encuentra en el Anexo 9.7. Esta herramienta metodológica constituye un insumo relevante para la investigación, en tanto permite contrastar marcos regulatorios, instrumentos económicos y enfoques tecnológicos implementados en países que han avanzado de manera significativa en la incorporación de los PFV dentro de políticas de economía circular y regímenes de responsabilidad extendida del productor (REP).

El análisis realizado trasciende la mera descripción comparativa, en la medida en que busca extraer lecciones y aprendizajes transferibles al contexto nacional. En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del benchmarking, enfatizando aquellos aspectos de mayor pertinencia para el diseño de políticas públicas en Chile. Sobre esta base, se propone posteriormente un conjunto de recomendaciones orientadas a subsanar vacíos regulatorios, fortalecer la institucionalidad vigente y fomentar prácticas de gestión sustentable y de valorización de los residuos fotovoltaicos.

#### 6.6.4.1 Conclusiones Benchmarking

El benchmarking desarrollado en el Anexo 9.7 permite observar cómo Alemania, Francia y Japón han adoptado distintos enfoques regulatorios y técnicos en torno a la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos (PFV), ofreciendo lecciones valiosas para el contexto chileno, donde la reciente Resolución Exenta N.º 3.413/2025 marca un hito al incluirlos en el régimen de Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

En primer lugar, Alemania y Francia, como Estados miembros de la Unión Europea, aplican la Directiva WEEE (Directiva 2012/19/UE, 2012), lo que asegura una inclusión explícita de los PFV en la REP con obligaciones vinculantes de registro, trazabilidad y metas de valorización. Chile, en contraste, recién incorpora a los PFV como producto prioritario, pero carece aún de una implementación efectiva de sistemas de registro detallado y marcado de equipos, lo que limita el control sobre la trazabilidad de los módulos.

En segundo lugar, tanto Alemania como Francia cuentan con protocolos técnicos específicos para el tratamiento de PFV, recogidos en la EAG-BehandV y en el Pliegos de condiciones de SOREN, además de normas como la EN 50625-2-4, que establece requisitos específicos de recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento de módulos FV al final de su vida útil. En Chile, si bien la normativa prevé la valorización y trazabilidad general de los PFV, todavía no existen normas técnicas específicas que definan protocolos de desmontaje, clasificación o tratamiento, lo que representa una brecha crítica para asegurar un reciclaje seguro y estandarizado.

En tercer lugar, mientras que la Unión Europea establece metas cuantitativas de reciclaje y valorización (75 % en Alemania y hasta 87 % en Francia), Chile fija objetivos iniciales más modestos (10 % al tercer año y 50 % al décimo), sin diferenciar entre tecnologías (silicio o capa fina). Esto contrasta con Alemania, Francia y Japón, donde se exige o recomienda la separación obligatoria de tecnologías, aspecto que Chile aún no contempla.

En cuanto lugar, Alemania, Francia y Japón se ha incorporado de manera explícita un principio jerárquico de reutilización (a través de recomendaciones técnicas en este último) para la prolongación de la vida útil antes del reciclaje, apoyándose con normas técnicas europeas como la EN 50625-2-4. En cambio, en Chile, la jerarquía de gestión es abordada en la Ley N.º

20.920, en la R.E N.º 3.413 no incorpora criterios técnicos para decidir cuándo puede ser reutilizado un PFV, por ejemplo, módulos con potencia  $\geq 80$  % de su nominal original y sin defectos estructurales.

Otro aspecto deficitario se relaciona con la declaración de composición y control de sustancias peligrosas. Alemania y Francia, a través de la normativa comunitaria, aplican límites obligatorios de metales pesados vía RoHS (Directiva (UE) 2015/863, 2015), mientras que Japón regula la importación de módulos que contengan cadmio, plomo o mercurio bajo la CSCL (Ministerio de Economía, 2015). En Chile no existe una obligación de declarar la composición de los PFV nuevos, lo que impide anticipar riesgos ambientales y sanitarios.

Finalmente, aunque el nuevo decreto chileno establece la obligación de financiamiento por parte de productores e importadores, aún no ha desarrollado un mecanismo de gobernanza institucional especializado. A diferencia de Francia, donde se creó un eco-organismo único y exclusivo para la gestión de paneles fotovoltaicos (SOREN), en Chile no existe una figura análoga, sino que se contempla la posibilidad de sistemas colectivos o individuales para los productores. La exclusividad de SOREN constituye una ventaja relevante, ya que permite concentrar recursos y capacidades en un solo flujo de residuos, garantizando especialización técnica, eficiencia logística y trazabilidad uniforme, además de facilitar el control estatal al centralizar la información en un único operador autorizado. En contraste, la fragmentación que podría derivarse del modelo chileno plantea desafíos en términos de coordinación, fiscalización y homogeneidad en el cumplimiento de estándares ambientales.

#### **6.6.4.2 Recomendaciones de mejora frente a un nuevo D.S. referente a la R.E N.º3.413**

La aprobación de un nuevo Decreto Supremo que incorpora explícitamente a los paneles fotovoltaicos dentro del régimen de la Ley REP representa un hito fundamental para el fortalecimiento de la economía circular y la protección ambiental en Chile. No obstante, el análisis realizado en este estudio evidencia la existencia de oportunidades de mejora que podrían contribuir a una gestión más eficiente y sostenible de estos residuos en el futuro. En este contexto, se presentan a continuación un conjunto de recomendaciones orientadas a complementar y robustecer el marco regulatorio vigente.

## Recomendaciones

1. Fortalecer la gobernanza institucional mediante la creación de un eco-organismo exclusivo para paneles fotovoltaicos mediante la incorporación de un artículo específico que faculte al Ministerio del Medio Ambiente a autorizar su creación.

**Argumento:** La existencia de sistemas de gestión individuales o colectivos, si bien otorga flexibilidad a los productores, genera importantes desafíos en términos de coordinación, fiscalización y homogeneidad en la aplicación de estándares ambientales. La creación de un eco-organismo único y exclusivo para PFV, siguiendo el modelo francés de SOREN, permitiría concentrar capacidades técnicas, estandarizar procesos de recolección y tratamiento, y simplificar la supervisión estatal al centralizar la información en un solo ente autorizado.

2. Elaborar Normas Chilenas (NCh) técnicas específicas basadas en normas internacionales (EN 50625-2-4), aprobadas por el Instituto Nacional de Normalización (INN), haciéndolas obligatorias vía Decreto del Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

**Argumento:** La ausencia de normas técnicas específicas en Chile limita el desarrollo de una industria de reciclaje segura y eficiente. La adopción de normas internacionales, como la EN 50625-2-4, permitiría estandarizar el desmontaje, la separación de tecnologías y el control de contaminantes, asegurando la calidad ambiental de los procesos. Su aprobación como NCh y su obligatoriedad vía decreto darían certeza jurídica y facilitarían la homologación con estándares europeos, mejorando además la competitividad del sector nacional.

3. Dictar, a través del Ministerio del Medio Ambiente, un Decreto Supremo que establezca la obligación de separar las tecnologías de paneles fotovoltaicos (silicio cristalino y capa fina) y que incorpore exigencias de control sobre la presencia de contaminantes en las fracciones resultantes del proceso de reciclaje.

**Argumento:** La separación de tecnologías es una práctica consolidada en la Unión Europea y Japón, debido a que los módulos de capa fina contienen sustancias críticas como cadmio y telurio que requieren manejos diferenciados. La implementación de esta obligación en Chile permitiría un tratamiento ambientalmente seguro y reduciría el riesgo de contaminación secundaria en las fracciones recicladas, facilitando además la

valorización de materiales estratégicos. Adicionalmente, la diferenciación entre tecnologías posibilita seleccionar la forma de reciclaje más efectiva para cada tipo de módulo, optimizando la recuperación de materiales y asegurando un uso más eficiente de los recursos disponibles.

4. Exigir a importadores/proveedores la declaración de componentes y sustancias críticas (Cd, Pb, Hg, Se, Te, In, Ga) en los paneles fotovoltaicos puestos en el mercado chileno vía Decreto Supremo.

**Argumento:** La ausencia de información sobre la composición química de los paneles fotovoltaicos constituye un vacío normativo que dificulta su clasificación y gestión diferenciada como residuos peligrosos. Si bien en la Unión Europea no se exige declarar dicha información al momento de importar o exportar módulos nuevos, estos sí están sujetos a regulaciones como la Directiva RoHS (indirectamente), que prohíbe la comercialización de equipos que superen determinados niveles de concentración de metales pesados. En contraste, en Chile no existe un marco equivalente que restrinja la entrada de PFV con sustancias peligrosas, lo que aumenta la incertidumbre sobre su manejo futuro y limita la capacidad de implementar una gestión diferenciada y ambientalmente segura.

5. Acortar los plazos de implementación y aumentar las metas para paneles fotovoltaicos mediante Decreto Supremo.

**Argumento:** Las metas propuestas en la R.E N.º 3.413/2025 (10 % al tercer año y 50 % al décimo) resultan conservadoras frente a las experiencias internacionales (Valorización mínima de PFV: 87 % y Reciclaje y preparación para reutilización (PFV): 82 % en el caso de Francia). Elevar las metas y reducir los plazos fortalecería la alineación con las mejores prácticas internacionales y daría un impulso a la industria nacional del reciclaje, generando empleos verdes y mayor recuperación de materiales críticos, teniendo en cuenta la alta proyección de residuos en el mediano plazo.

6. Dictación de un Decreto Supremo complementario o modificatorio del D.S N.º 148/2003, que incorpore de manera explícita a los paneles fotovoltaicos dentro de su ámbito de aplicación, diferenciando entre tecnologías de silicio cristalino y de capa fina. Este instrumento debería establecer la obligatoriedad de registrar cada movimiento de PFV fuera de uso en el sistema SIDREP mediante un e-manifiesto, siguiendo el modelo implementado en Japón a través del sistema JWNET. Asimismo, debiera fijar protocolos

específicos para el transporte, almacenamiento y control de fracciones derivadas del tratamiento de estos residuos, además de reforzar los mecanismos de control transfronterizo en coherencia con el Convenio de Basilea, asegurando una trazabilidad robusta y alineada con los estándares internacionales.

**Argumento:** El D.S N.º 148/2003 regula residuos peligrosos en general, pero no incorpora de forma explícita a los PFV, lo que genera ambigüedad en su gestión. Una modificación o decreto complementario permitiría cerrar este vacío, garantizando trazabilidad en tiempo real mediante e-manifiestos y reforzando el control transfronterizo, tal como ocurre en Japón con JWNET. Esto fortalecería la transparencia y reduciría el riesgo de exportaciones ilegales o de disposiciones inadecuadas.

7. Se recomienda la elaboración de un Decreto Supremo que exija la incorporación de un certificado de funcionalidad o de desuso obligatorio para paneles fotovoltaicos destinados a importación/exportación, que permita diferenciar claramente entre equipos usados con potencial de reutilización y residuos que deben gestionarse bajo el marco del Convenio de Basilea.

**Argumento:** Actualmente, Chile no cuenta con un mecanismo que permita distinguir formalmente entre un panel usado y un residuo al momento de la exportación, lo que abre espacio para que residuos sean enviados al extranjero sin cumplir con Basilea. La exigencia de un certificado de funcionalidad o de desuso, similar al modelo de la Unión Europea, aportaría seguridad jurídica, facilitaría la fiscalización en aduanas y cerraría la puerta a exportaciones encubiertas de residuos peligrosos.

8. Incorporar artículo específico al nuevo Decreto Supremo que establezca la obligación de marcaje en los paneles fotovoltaicos (PFV), que consigne de forma visible y permanente información relativa a su identificación de productor o importador y a su condición de reciclabilidad.

**Argumento:** El marcaje de los PFV con datos de productor e información sobre su reciclabilidad es una práctica regulada en la UE bajo la Directiva WEEE. Su implementación en Chile permitiría identificar al responsable del producto en el marco de la REP, mejorar la trazabilidad y entregar información clave a gestores y recicladores.

## 6.7 Modelos de negocio ante la incorporación de los PFV a la Ley REP

Ante la eventual incorporación de los paneles fotovoltaicos (PFV) al régimen de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), Chile se verá expuesto a grandes desafíos tecnológicos y de infraestructura, considerando que las capacidades nacionales para el reciclaje de estos residuos aún son incipientes. Actualmente, la gestión de residuos se realiza mayoritariamente mediante exportación de componentes o disposición de rellenos, sin procesos locales de recuperación avanzada de materiales como silicio, plata o telurio. A esto se suma la proyección de que, para el año 2025, existirán aproximadamente 5.273 toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos (AGIES, 2025) y que, según lo señalado en el capítulo 4.3.1, hacia 2046 se alcanzará un peak en la generación de estos desechos, surge la necesidad de explorar modelos de negocios que permitan viabilizar el cumplimiento normativo, fomentar la innovación y crear valor económico a partir de los residuos fotovoltaicos.

### 6.7.1 Descripción de modelos de negocios

De las etapas del ciclo de vida de los residuos, se pueden identificar oportunidades de negocio en cada una de estas (Ver Fig. 16), cuyas descripciones se encuentran en el Anexo 9.8

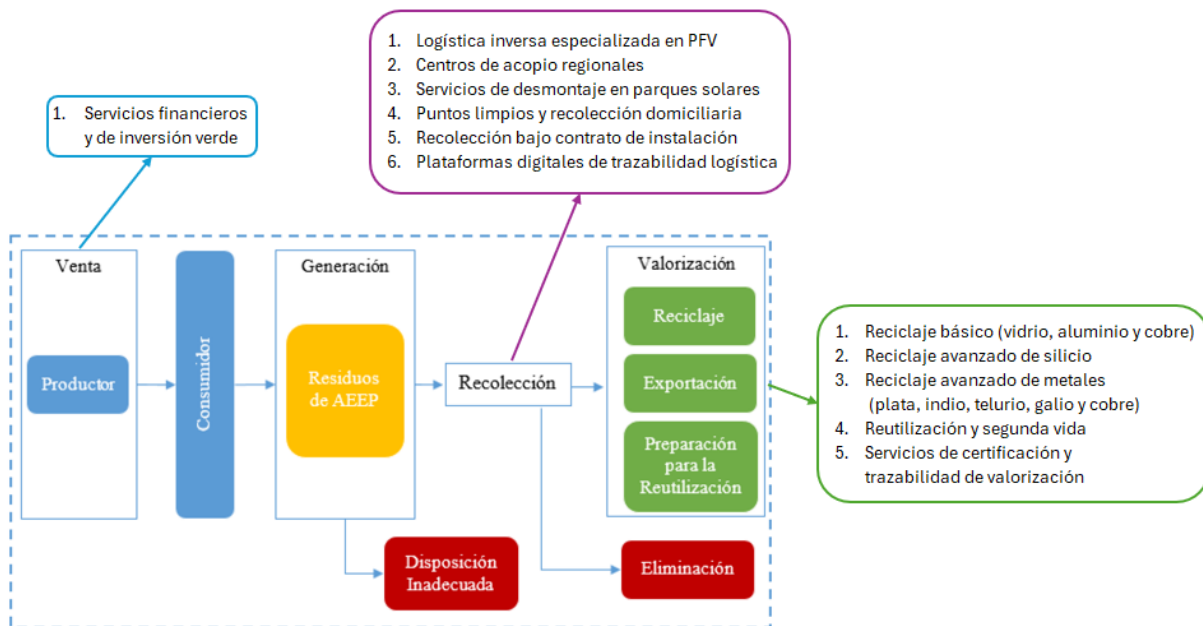


Fig. 16: Oportunidades de Negocio identificadas en cada etapa del ciclo de vida de los PFV (Elaboración propia).

De los modelos de negocio analizados, es posible identificar que en Chile ya existen experiencias aplicadas a otros flujos de residuos en el marco de la Ley REP (Ver Tabla 12), lo que facilitaría su adaptación al caso de los paneles fotovoltaicos (PFV).

*Tabla 12: Modelos de negocio existentes.*

| <b>Modelo REP existente</b>                            | <b>Aplicación actual en Chile</b>  | <b>Posible adaptación a PFV</b>   | <b>Facilidad de implementación</b>  |
|--|--|---|---|
| <b>Reciclaje básico (vidrio, aluminio y cobre)</b>     | Gestores de chatarra, vidrio y RAEE valorizan materiales simples.                        | Recuperar marcos de aluminio, cables de cobre y vidrio de paneles. Implementar procedimientos de manejo de residuos peligrosos. | <b>Alta</b> – ya existe mercado y tecnología disponible.                  |
| <b>Servicios de certificación y trazabilidad</b>       | Consultoras y plataformas (SINGREP) reportan flujos de envases, neumáticos y RAEE.       | Certificación de paneles reacondicionados y trazabilidad de valorización FV.  | <b>Alta</b> – depende de integrar categoría PFV a sistemas ya existentes. |
| <b>Logística inversa especializada</b>                 | Transporte de RAEE y residuos peligrosos por empresas autorizadas bajo D.S N.º 148/2003. | Recolección y traslado seguro de paneles desde parques solares y hogares.   | <b>Alta</b> – empresas ya cuentan con permisos y experiencia.             |
| <b>Centros de acopio regionales</b>                    | Acopios de neumáticos, RAEE y envases en bodegas autorizadas.                            | Establecer centros regionales de acopio de PFV con ajustes en seguridad.  | <b>Media</b> – requiere permisos adicionales para residuos peligrosos.    |
| <b>Recolección bajo contrato de instalación</b>        | Empresas especializadas en instalación de paneles fotovoltaicos.                         | Instaladoras solares pueden ofrecer retiro y disposición futura de paneles.   | <b>Alta</b> – modelo replicable con contratos de servicio.                |
| <b>Plataformas digitales de trazabilidad logística</b> | Softwares que integran datos de gestión REP y reportes normativos.                       | Desarrollo de plataformas para seguimiento de paneles por número de serie.  | <b>Alta</b> – solo requiere extensión tecnológica.                        |

*Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, las oportunidades de negocio a largo plazo resultan altamente atractivas por su potencial económico y estratégico, como el reciclaje avanzado de silicio o de metales raros, su materialización requiere de fuertes inversiones en investigación y desarrollo (I+D), al igual que ocurre en países como Japón, donde se han impulsado programas estatales y privados para perfeccionar tecnologías de recuperación de materiales estratégicos. Por esta razón, dichas

alternativas no serán abordadas en este capítulo, aunque constituyen líneas de acción fundamentales para la sostenibilidad futura del sector.

En contraste, existe un modelo de negocio de corto plazo particularmente atractivo, basado en otorgar una segunda vida útil a los paneles fotovoltaicos (PFV). Esta estrategia contempla la certificación de su funcionamiento para destinarlos a usos de menor exigencia, como sistemas domiciliarios o aplicaciones rurales off-grid. Esta alternativa cobra especial relevancia en el contexto chileno, dado que diversas plantas solares se encuentran ya en la mitad de su ciclo de vida útil y podrían optar por el recambio anticipado de paneles fotovoltaicos por criterios económicos, en vez de técnicos, dado que la reducción en los costos de nuevas tecnologías y la mejora en sus niveles de eficiencia hacen viable reemplazar equipos antes del término de su vida útil nominal (Rosas, 2022). En este escenario, la reutilización y recertificación de los módulos retirados abre un mercado secundario para los PFV, consolidándose como una oportunidad estratégica. Por una parte, facilita la electrificación rural a bajo costo, ampliando el acceso a energías limpias en comunidades aisladas; y, por otra, permite prolongar el valor de los paneles dentro de un marco de economía circular, generando de manera más inmediata beneficios sociales, ambientales y económicos.

### **6.7.2 Modelo de Negocio de “Segunda Vida” de PFV**

El Modelo de Negocio CANVAS desarrollado (Ver Fig. 17) se centra en la reutilización de paneles solares fotovoltaicos, proponiendo un esquema innovador que busca extender su vida útil y generar un mercado secundario formal en Chile. A través de la recertificación, el reacondicionamiento y la garantía técnica, este modelo ofrece soluciones confiables y de menor costo frente a los módulos nuevos, contribuyendo a la masificación de la energía solar en sectores residenciales, pymes y comunidades rurales. La estrategia se apoya en una plataforma digital que facilita la trazabilidad y la logística inversa, integrando además alianzas con instaladores solares certificados, municipios y CORFO para impulsar programas piloto. De esta forma, la reutilización de paneles se convierte en un eje clave de la economía circular, aportando valor ambiental al reducir residuos y emisiones de CO<sub>2</sub>, al mismo tiempo que abre nuevas oportunidades económicas y sociales en el marco de la Ley REP.

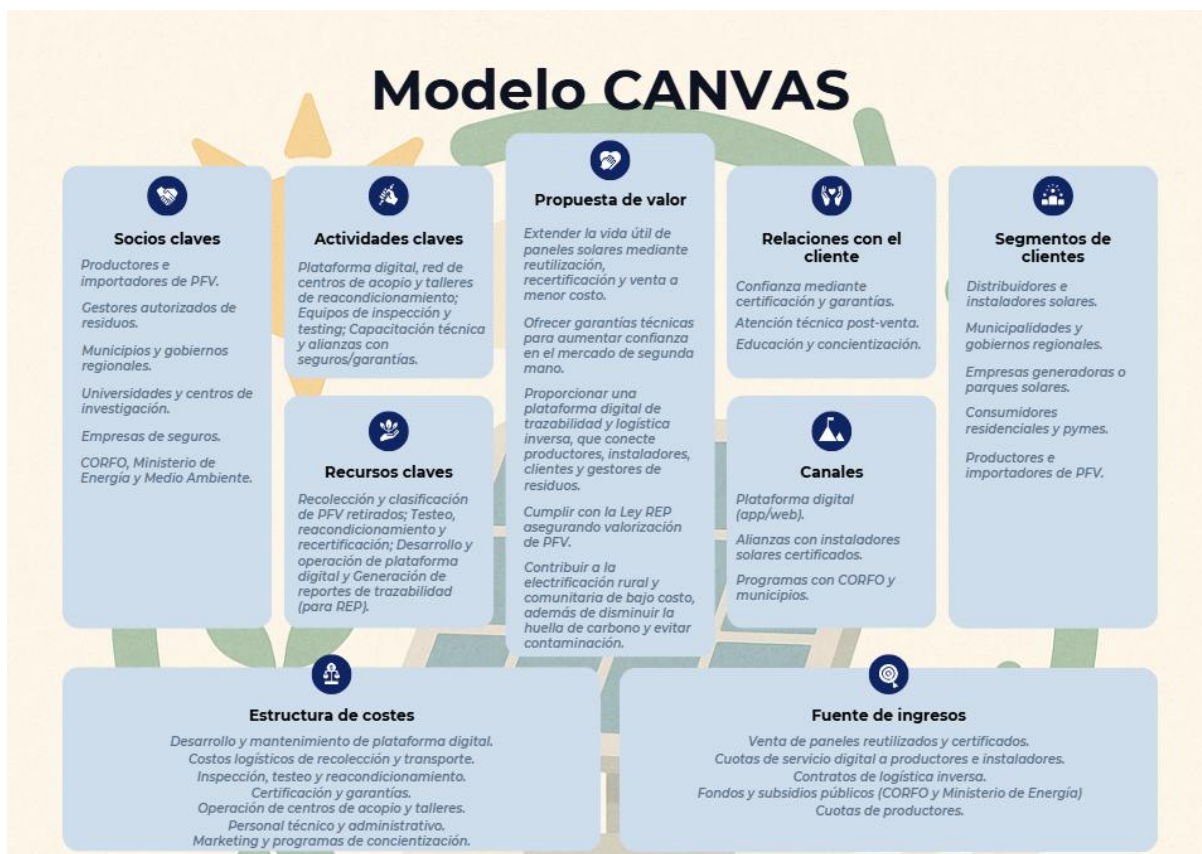


Fig. 17: Modelo de Negocio CANVAS para Segunda Vida de PFV (Elaboración propia).

Este modelo Canvas, en complemento con el análisis FODA realizado (Anexo 9.11), permite concluir que la reutilización y recertificación de paneles fotovoltaicos en Chile constituye una estrategia pertinente y alineada a los principios de la economía Circular, aportando al cumplimiento de la Ley REP. El modelo demuestra que, a través de una plataforma digital de trazabilidad y logística inversa, sumada a alianzas con instaladores certificados, municipios y organismos públicos, es posible dar una segunda vida a los módulos retirados, generando beneficios ambientales al reducir residuos y emisiones de CO<sub>2</sub>, sociales al facilitar la electrificación rural y comunitaria, y productivos al abrir un mercado secundario formal para los PFV.

El análisis FODA complementa esta visión estratégica al resaltar fortalezas vinculadas con la incorporación de los paneles fotovoltaicos en la Ley REP y la posibilidad de ofrecer una reducción significativa en los costos para los clientes finales. Asimismo, reconoce oportunidades en el creciente volumen de recambio proyectado entre 2030 y 2040 y en el apoyo de programas públicos como CORFO, que facilitan el desarrollo de proyectos piloto. Sin

embargo, también expone debilidades relevantes, como la carencia de infraestructura especializada y la limitada cultura de reutilización tecnológica en el país. Finalmente, advierte amenazas externas que pueden afectar la viabilidad del modelo, entre ellas la caída sostenida en los precios de los módulos nuevos y los elevados costos logísticos derivados de la geografía chilena.

Por último, es importante precisar que la presente investigación no incluye un análisis económico-financiero del modelo propuesto. La razón de esta delimitación es que el propósito del estudio se centra en la caracterización estratégica, normativa y técnica del modelo de reutilización, más que en su evaluación de rentabilidad. El análisis económico, que implicaría proyectar flujos de caja, costos logísticos, CAPEX y OPEX de reacondicionamiento, así como simulaciones de escenarios de mercado, se reconoce como una línea de investigación futura necesaria para determinar la factibilidad financiera y la escalabilidad del sistema en el contexto chileno.

## 7 Conclusiones

La presente investigación permitió analizar en profundidad los desafíos ambientales, regulatorios y económicos asociados a la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos (PFV) en Chile, en el marco de la transición energética y de la Ley N° 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). A partir del estudio de la evolución normativa nacional, la revisión comparada de experiencias internacionales y la evaluación de modelos de negocio emergentes, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

- I. El sostenido crecimiento de la capacidad solar instalada en Chile, que a 2024 supera los 10 GW y proyecta un incremento aún más acelerado hacia 2030, anticipa la generación de volúmenes significativos de residuos fotovoltaicos hacia mediados de siglo, coincidiendo con los horizontes de planificación energética al año 2050. Este fenómeno plantea un doble desafío: por una parte, consolidar a la energía solar como pilar de la matriz eléctrica en el marco de los compromisos de carbono neutralidad; y por otra, enfrentar los impactos ambientales derivados del fin de vida útil de los paneles, cuya duración se estima entre 25 y 30 años. La presencia de materiales peligrosos (plomo, cadmio, selenio) acentúa los riesgos ambientales y sanitarios, mientras que el alto potencial de valorización de componentes estratégicos (vidrio, aluminio, cobre, plata, silicio) abre oportunidades para el desarrollo de cadenas de valor circulares. En este contexto, la incorporación de los paneles fotovoltaicos dentro de la categoría de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) en la futura reglamentación de la Ley REP (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025) constituye un hito regulatorio relevante, en tanto reconoce la magnitud de este flujo emergente de residuos y lo vincula con los objetivos de sostenibilidad y seguridad material de la política energética nacional al 2050.
- II. Hasta antes de la Resolución Exenta N° 1.268/2023 y de la propuesta de Decreto Supremo sobre Pilas y AEE, los PFV no estaban explícitamente contemplados en la Ley REP ni en sus decretos derivados, lo que generaba vacíos técnicos y jurídicos. La nueva regulación aborda parte importante de estas falencias al incorporar metas de recolección específicas para PFV industriales con un horizonte gradual de 10 años, al establecer definiciones diferenciadas para PFV según tamaño y aplicación (domésticos o

industriales), al exigir trazabilidad desde la puesta en el mercado hasta la valorización y obligar a los productores a garantizar financieramente la gestión presente y futura. Sin embargo, persisten vacíos significativos en el ámbito de las políticas públicas. La inexistencia de normas técnicas específicas para el tratamiento de paneles fotovoltaicos y la falta de criterios claros para su clasificación según componentes y peligrosidad generan una doble dificultad: por un lado, impiden establecer protocolos de reciclaje seguros y diferenciados para tecnologías con composiciones químicas diversas; y por otro, retrasan la consolidación de capacidades nacionales de valorización, al mantener la gestión de estos residuos en un escenario de incertidumbre normativa. Esta carencia regulatoria, en consecuencia, amenaza con limitar la eficacia del régimen REP e incrementar la dependencia de soluciones externas, como la exportación de residuos, en lugar de fomentar el desarrollo de infraestructura local alineada con los objetivos de la transición energética y la economía circular.

- III. El AGIES del proyecto definitivo de Decreto Supremo mostró una razón beneficio/costo de 0.64 en el escenario agregado de pilas y AEE; y de 0.68 en el caso específico de paneles fotovoltaicos (AGIES, 2025), lo que implica que los costos de implementar la regulación no superan los beneficios. No obstante, cuando se consideran los beneficios indirectos, como beneficios sociales y ambientales (empleos verdes y disminución de residuos peligrosos en vertederos), los beneficios intangibles adquieren relevancia para un desarrollo sostenible alineado a los desafíos energéticos 2050.
- IV. La comparación internacional entrega aprendizajes relevantes para Chile. En Alemania, la Ley ElektroG establece un sistema de trazabilidad mediante el registro en la Fundación del Registro de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Stiftung EAR), con metas estrictas, financiamiento dual (nivel 1: pay-as-you-go y nivel 2: garantía a futuro) y diferenciación entre B2C (recogida gratuita en puntos municipales y distribuidores) y B2B (gestión mediante contratos privados). En Francia, la gestión se centraliza en SOREN, eco-organismo exclusivo para PFV, financiado colectivamente por los productores, con metas de valorización ambiciosas, un régimen sancionador estricto y distinción entre B2C y B2B. En Japón, la responsabilidad recae directamente en el generador, complementada con apoyo estatal a la I+D y guías técnicas que promueven la clasificación por peligrosidad y tecnologías de reutilización avanzada.

Estas experiencias sugieren que Chile debe avanzar hacia un modelo híbrido que combine la trazabilidad y garantías financieras de Alemania, la coordinación y financiamiento colectivo de Francia y la innovación tecnológica y clasificación temprana de Japón, alineando la gestión de residuos fotovoltaicos con los objetivos de la transición energética y la economía circular al 2050.

- V. La valorización de los paneles fotovoltaicos abre oportunidades para el desarrollo de una industria circular nacional, mediante:
- Reutilización y recertificación de módulos para electrificación rural o urbana, hasta posible exploración en exportación a países vecinos.
  - Centros de acopio y logística inversa como nichos empresariales regionales.
  - Innovación en procesos de reciclaje avanzado de silicio y metales raros.
  - Servicios digitales de trazabilidad y certificación ambiental.

El modelo canvas elaborado evidencia que tanto empresas privadas como cooperativas de gestión colectiva pueden capturar valor en diferentes eslabones de la cadena.

- VI. El éxito del futuro decreto y de la política de reciclaje de paneles fotovoltaicos en Chile dependerá de al menos cuatro condiciones críticas: **(i)** un apoyo institucional y financiero suficiente para desarrollar infraestructura local de tratamiento, evitando la dependencia exclusiva de la exportación; **(ii)** la definición de normas técnicas y certificaciones que aseguren condiciones seguras de desmontaje, transporte, almacenamiento y valorización; **(iii)** la participación activa de productores y consumidores bajo principios de corresponsabilidad, respaldada por incentivos que fomenten modelos de negocio circulares; y **(iv)** la superación del marcado desconocimiento social respecto de las políticas y de las prácticas de reciclaje de PFV, que hoy constituye un obstáculo estructural. La ausencia de información accesible y campañas de sensibilización puede traducirse en bajos niveles de cumplimiento, informalidad en la disposición final y deslegitimación del propio régimen REP. Por ello, la educación ambiental y la transparencia comunicacional resultan tan estratégicas como las medidas regulatorias y financieras, ya que sin la adhesión de la ciudadanía la política corre el riesgo de transformarse en una obligación formal de escasa eficacia práctica.

En síntesis, los PFV representan simultáneamente un riesgo ambiental y una oportunidad estratégica: riesgo por su volumen y toxicidad potencial, y oportunidad por el valor

económico de sus materiales y por el impulso a la economía circular. El futuro de su gestión dependerá de la capacidad del Estado de diseñar políticas públicas coherentes y del sector privado de innovar en modelos de negocio sostenibles, de modo que la transición energética de Chile no genere una nueva deuda ambiental, sino que se consolide como un motor de desarrollo sustentable.

## 7.1 Limitaciones del estudio

Si bien la investigación aporta un análisis integral de los desafíos ambientales y del rol de las políticas públicas en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en Chile, es necesario reconocer una serie de limitaciones que condicionan el alcance y la generalización de los resultados:

- 1 Disponibilidad y actualización de la información estadística:** La proyección de volúmenes de residuos se basa en estudios nacionales previos al 2023, por lo que existe un grado de incertidumbre en las proyecciones.
- 2 Etapa incipiente de la regulación nacional:** Al momento del estudio, los PFV aún no están plenamente incorporados como producto prioritario en la Ley REP, sino solo en calidad de propuesta (Resolución Exenta N.º 3.413, 2025). Por ello, el análisis de impactos regulatorios se centra en proyecciones y no en resultados empíricos de aplicación.
- 3 Falta de estudios técnicos específicos en Chile:** La investigación debió apoyarse en literatura internacional para describir procesos de reciclaje y valorización de silicio, metales raros y tecnologías de capa fina, ya que en el país no existen estudios ni casos prácticos implementados.
- 4 Limitaciones metodológicas en la comparación internacional:** El benchmarking con Alemania, Francia y Japón permitió extraer lecciones valiosas, pero las diferencias en contextos regulatorios, económicos y sociales limitan la extrapolación directa de estos modelos al caso chileno.
- 5 Carencia de estudios sobre percepción y conocimiento social:** Si bien se reconoce el desconocimiento ciudadano respecto del reciclaje de PFV como un desafío central, este estudio no incorpora trabajo de campo ni encuestas de percepción social, lo que deja

pendiente un análisis más profundo sobre aceptación y disposición al cumplimiento de la normativa.

- 6 **Análisis económico no realizado:** El estudio exploró modelos de negocio para la gestión de PFV, pero no desarrolló un análisis económico detallado debido a la falta de información nacional sobre costos e infraestructura, así como a la incertidumbre que aún genera la implementación de la nueva normativa.
- 7 **Limitaciones con el idioma:** El análisis de las normativas de Alemania, Francia y Japón requirió revisar documentos en sus idiomas originales, lo que generó dos limitaciones principales: (i) dependencia de traducciones oficiales, literatura secundaria o resúmenes institucionales, con posibles sesgos interpretativos, y (ii) dificultad para homologar categorías y términos jurídicos, obligando a ajustes interpretativos para compararlos con el marco chileno. Si bien se consultaron fuentes reconocidas, no siempre fue posible acceder a versiones completas en traducción oficial, lo que restringe la exhaustividad del análisis. Por ello, este estudio debe entenderse como una aproximación crítica y comparada, sugiriendo que futuras investigaciones incorporen apoyo de expertos nativos o traducciones jurídicas especializadas.

En consecuencia, los resultados deben ser interpretados como un marco analítico y propositivo, más que como una predicción cerrada del comportamiento futuro del sistema. Estas limitaciones abren, a la vez, oportunidades para investigaciones posteriores orientadas a la construcción de bases de datos nacionales, estudios tecnológicos aplicados, evaluaciones de política en su implementación y análisis de percepción social.

## 7.2 Proyecciones para futuras investigaciones

A partir de las limitaciones identificadas, se delinearán diversas proyecciones para orientar futuras investigaciones en el ámbito de la gestión de residuos fotovoltaicos en Chile:

- **Bases de datos nacionales:** desarrollar estadísticas oficiales sobre puesta en el mercado, vida útil y volúmenes de residuos de PFV.
- **Evaluación normativa:** estudiar la implementación de la nueva normativa y su impacto en metas, costos y fiscalización.
- **Investigación tecnológica:** validar a nivel nacional procesos de recuperación y valorización de materiales críticos en Chile.

- **Percepción social:** analizar conocimiento ciudadano y barreras culturales para diseñar programas de educación y sensibilización.
- **Modelos de negocio:** realizar estudios de factibilidad económica para logística inversa, centros de acopio y plantas de reciclaje.

En conjunto, estas líneas de investigación permitirán generar evidencia empírica que anticipe la ola de residuos fotovoltaicos proyectada y la transforme en una oportunidad de desarrollo sostenible hacia 2050.

## 8 Referencias

- Acuerdo N°13. (2025). *Se pronuncia favorablemente sobre la propuesta de Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos.*
- AGIES. (2025). *Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) - Proyecto definitivo de propuesta de D.S de P+AEE.*
- Artículo L541-10. (2024). *Code de l'environnement.*
- Artículo R.541-99. (s. f.). *Article R541-99 - Code de l'environnement - Légifrance.*
- Artículos R543-172 a R543-206. (2021). *Code de l'environnement – Articles R543-172 à R543-206 relatifs aux déchets d'équipements électriques et électroniques.*
- Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento [ACERA]. (2025).*  
<https://www.acera.cl/centro-de-informacion/>.
- Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica. (2017). Guía para la provisión de información sobre el tratamiento adecuado de módulos solares usados (1ª ed.).*  
<http://www.jpea.gr.jp/index.html>
- Barretta, C. (2022). *Characterization of material interactions of polymers in PV modules [Tesis Doctoral, Montanuniversität Leoben].* Montanuniversität Leoben.
- Bundesministerium der Justiz. (2022). *Ley sobre la comercialización, recogida y eliminación ecológica de aparatos eléctricos y electrónicos.* [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)
- Decreto N.º 2020-1455. (2020). *Décret n° 2020-1455 du 27 novembre 2020 portant réforme de la responsabilité élargie des producteurs.* <https://legifrance.gouv.fr>
- Decreto Supremo 8. (2017). *Reglamento que regula el procedimiento de elaboración de los Decretos Supremos establecidos en la Ley N° 20.920.*
- Decreto Supremo 38. (2017). *Promulga el convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes y sus anexos. En RELACIONES (Vol. 38).*

- Decreto Supremo 148. (2004). *Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.*
- Decreto Supremo 685. (1992). *Promulga el “Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación”.*
- Decreto Supremo N°8. (2021). Establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de neumáticos. En *Decreto* (Vol. 8). MEDIO.
- Decreto Supremo N°148. (2004). *Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Ministerio de Salud de Chile.*
- Departamento de Economía Ambiental. (2025). *Análisis General de Impacto Económico y Social de metas de recolección y valorización para el producto prioritario “Pilas y Aparatos Eléctricos y Electrónicos” contenido en la Ley 20.920.*
- Directiva 2012/19/UE. (2012). *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (refundición).*
- Directiva (UE) 2015/863. (2015). *Directiva (UE) 2015/863 del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2011/65/UE en lo que respecta a la lista de sustancias restringidas.*
- EAG-BehandV. (2021). Verordnung über Anforderungen an die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung – EAG-BehandV). En *BGBl. I S. 1841*. [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)
- Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG. (2022). Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). En *BGBl. I S. 1739, zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 08.12.2022 (BGBl. I S. 2240)*. [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)
- In-Data & RIGK. (2020a). *Informe 1: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil.*

- In-Data & RIGK. (2020b). *Informe 3: Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil.*
- Instituto UNAB de Políticas Públicas. (2024). *Sondeo percepción de conocimiento de la Ley REP y reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos.*
- Irrarázaval, C. (2019). *Inecuación ernc: Análisis costo-beneficio de las energías renovables no convencionales y de las políticas públicas para su promoción [Tesis de Postgrado, Universidad de Chile].* Universidad de Chile.
- I-Vert Energy. (2023). *I-Vert Energy.* <https://www.salvis-e.com/tecnologia-perc-nanotecnologia-en-paneles-solares/>.
- Journal officiel de la République française, n° 255. (2021). *Arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.* <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Journal officiel de la République française n°59, texte n°9. (2022). *Arrêté du 4 mars 2022 modifiant l'arrêté du 22 décembre 2021 portant agrément d'un éco-organisme de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.* <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Journal officiel de la République française n°304. (2021). *Arrêté du 22 décembre 2021 portant agrément d'un éco-organisme de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques (catégorie 7: panneaux photovoltaïques).* Journal officiel de la République française. <https://www.legifrance.gouv.fr>
- KrWG. (2023). *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).* En *BGBl. I S. 212, zuletzt geändert durch Art. 5 G v. 02.03.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56).* [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)
- Lamigueiro, O. P. (2023). *Energía Solar Fotovoltaica.* <https://github.com/oscarperpinan/esf>

- Ley N.º 145. (2002). *Ley sobre la Organización para el Desarrollo de Nuevas Energías y Tecnologías Industriales*.
- Ley N.º 2020-105. (2020). *Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire*.
- Ley N.º 20.920. (2016). *Establece Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje*.
- Ley N.º 137. (1970). *Ley de Gestión de Residuos y de Limpieza Pública (Ley N.º 137 de 1970, y enmiendas posteriores)*.
- Massardo, F. (2025). *Ley REP y su cumplimiento: ¿Qué nos estará faltando? - País Circular*.  
<https://www.paiscircular.cl/sin-categoria/ley-rep-y-su-cumplimiento-que-nos-estara-faltando/>
- Ministerio de Economía, C. e I. de J. (2015). *Recent progress of Chemical Substances Control Law (CSCL)*.
- Ministerio de Economía, C. e I. de J. (2025). *Plan Estratégico de Energía de Japón 2025*.
- Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050: Política Energética de Chile*.
- Ministerio de Energía. (2022). *Transición Energética de Chile. Política Energética Nacional – Actualización 2022*.
- Ministerio de Energía. (2023). *Agenda inicial para un segundo tiempo de la transición energética*.
- Ministerio de Energía. (2025). *mienergia*.  
[https://www.mienergia.cl/sites/default/files/5\\_presentacion\\_curso\\_imprimir\\_1.pdf](https://www.mienergia.cl/sites/default/files/5_presentacion_curso_imprimir_1.pdf)
- Ministerio del Medio Ambiente de Japón. (2021). *Guía para la promoción adecuada de la reutilización de módulos fotovoltaicos*.
- Ministerio del Medio Ambiente de Japón. (2024). *Guía para la promoción del reciclaje de instalaciones de energía solar fotovoltaica (3ª ed.)*.

National Library of Medicine. (2025). National Center for Biotechnology Information. En <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537762/>. Universidad de Chile.

OCDE. (2025). *Environment at a Glance: Chile*.

[https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-country-notes\\_59ce6fe6-en/chile\\_5dfd16fb-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/environment-at-a-glance-country-notes_59ce6fe6-en/chile_5dfd16fb-en.html)

Organización Panamericana de la Salud. (2025). <https://www.paho.org/es/temas/plomo>.

Pereda, I. (2025). *Seminario abordó aprendizajes, desafíos y oportunidades en torno a la implementación de la Ley REP - País Circular*. <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/seminario-abordo-aprendizajes-desafios-y-oportunidades-en-torno-a-la-implementacion-de-la-ley-rep/>

Resolución Exenta 207. (2022). *Pone término al proceso que se indica y da inicio al proceso de elaboración del Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos, y regula un sistema de depósito y reembolso*.

Resolución Exenta 310. (2021). *Pone término al proceso que se indica y da inicio al proceso de elaboración del Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos, y regula un sistema de depósito y reembolso*.

Resolución Exenta N.º 1.268. (2023). *Da inicio a período de información pública para la recepción de antecedentes necesarios para regular a los paneles fotovoltaicos en la propuesta de decreto supremo...*

Resolución Exenta N.º 3.413. (2025). *Aprueba la propuesta de decreto supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de pilas y aparatos eléctricos y electrónicos*.

Romero, J. (2019). *Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos [Tesis de Posgrado, Universidad de Chile]*. Universidad de Chile.

- Rosas, I. (2022). *Modelo de proyección de residuos fotovoltaicos y opciones de uso para su revalorización [Tesis de Posgrado, Universidad de Chile]*.
- Strupeit, L., Tojo, N., Clyncke, J., Franco, M., Cycle, P. V, Ismaël, B., & Futech, B.-A.-L. (2023). *Circular business models for the solar power industry: Guide for policy makers (Deliverable D5.7, Version 2.0)Organization*. <https://circusol.eu/>
- Tao, M., Fthenakis, V., Ebin, B., Steenari, B. M., Butler, E., Sinha, P., Corkish, R., Wambach, K., & Simon, E. S. (2020). *Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling*. 28(10), 1077–1088. <https://doi.org/10.1002/pip.3316>

## 9 Anexos

### 9.1 Análisis FODA del D.S. N.º 685/1992

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

| <b>FORTALEZAS</b>  | <b>Referencias</b> |
|--|--------------------|
| 1. Reconocimiento internacional: tratado ratificado por más de 170 países.                                 | Preámbulo, Art. 2  |
| 2. Clasificación de residuos peligrosos: incluye metales presentes en PFV como plomo, cadmio y telurio.    | Anexo I, Y19–Y45   |
| 3. Exigencia de Manejo Ambientalmente Racional (MAR) para todos los residuos peligrosos.                   | Art. 2.8           |
| 4. Control del comercio internacional: exige consentimiento previo por escrito y trazabilidad documentada. | Art. 6.1 y 6.3     |
| 5. Tipificación del tráfico ilícito como delito ambiental.   | Art. 9.1           |

| <b>OPORTUNIDADES</b>  | <b>Referencias</b>             |
|---|--------------------------------|
| 1. Impulso indirecto al desarrollo de infraestructura nacional de reciclaje de PFV, dado que exportarlos es costoso y regulado. | Anexo IV (operaciones R4 y R5) |
| 2. Posibilidad de cooperación internacional con países con capacidad instalada.   | Art. 11.1                      |
| 3. Mejora de la trazabilidad mediante sistemas de notificación y documentación.   | Art. 6                         |
| 4. Fortalecimiento del control aduanero contra exportaciones ilegales.  | Art. 9                         |

| <b>DEBILIDADES</b>   | <b>Referencias</b> |
|--|--------------------|
| 1. Aplicación limitada: solo regula residuos, no productos nuevos.                                 | Art. 1 y 2         |
| 2. Procedimiento burocrático: notificación y autorización pueden retrasar exportaciones legítimas. | Art. 6.3           |
| 3. No mención explícita a paneles FV: depende de interpretación de categorías de metales pesados.  | Anexo I            |
| 4. Dependencia de capacidad técnica nacional para implementar el Convenio.                         | Art. 4             |

| <b>AMENAZAS</b>   | <b>Referencias</b>               |
|---|----------------------------------|
| 1. Acumulación de residuos FV si no existe capacidad nacional.                          | Art. 4.2                         |
| 2. Altos costos de exportar residuos para reciclaje en el extranjero.                   | Art. 6.4 (garantías financieras) |
| 3. Riesgo de incumplimiento y cuestionamientos internacionales por falta de aplicación. | Art. 4                           |
| 4. Tráfico ilícito de residuos FV hacia países con regulaciones débiles.                | Art. 9.1                         |

## 9.2 Análisis FODA del D.S. N.º 148/2004

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

| <b>FORTALEZAS</b>  | <b>Referencias</b> |
|--|--------------------|
| <i>1. Marco regulatorio claro para residuos peligrosos, aplicable a paneles FV con plomo y cadmio.</i>               | Art. 1-2, Anexo 1  |
| <i>2. Obliga a planes de manejo para generadores de residuos peligrosos, aplicable a empresas de energía solar.</i>  | Art. 25-26         |
| <i>3. Sistema de declaración y seguimiento (SIDREP) para trazabilidad de paneles FV desechados.</i>                  | Art. 80-83         |
| <i>4. Exigencias técnicas para almacenamiento y transporte que reducen riesgos de dispersión de metales pesados.</i> | Art. 29-67         |
| <b>OPORTUNIDADES</b>   | <b>Referencias</b> |
| <i>1. Impulso al reciclaje especializado: fomenta indirectamente la creación de plantas específicas para PFV.</i>    | Art. 26, 52        |
| <i>2. Desarrollo de infraestructura para disposición final y tratamiento con líneas para PFV.</i>                    | Art. 43-48         |
| <i>3. Integración con compromisos internacionales (Basilea, Estocolmo) para metales pesados y COPs.</i>              | Considerando 1-3   |
| <i>4. Innovación en economía circular: promueve recuperación de vidrio, aluminio y silicio de PFV.</i>               | Art. 26, 52        |
| <b>DEBILIDADES</b>   | <b>Referencias</b> |
| <i>1. No mención explícita a paneles FV: aplicación depende de interpretación normativa.</i>                         | General            |
| <i>2. Altos costos de cumplimiento para importadores o generadores de PFV.</i>                                       | Art. 25-26         |
| <i>3. Dependencia de la fiscalización de la Autoridad Sanitaria para gestión de PFV.</i>                             | Art. 2             |
| <i>4. Carencia de articulación con la Ley REP, dejando vacíos en gestión preventiva.</i>                             | General            |
| <b>AMENAZAS</b>  | <b>Referencias</b> |
| <i>1. Acumulación de paneles FV en vertederos por falta de infraestructura de reciclaje.</i>                         | Art. 29-32         |
| <i>2. Manejo ilegal o informal de PFV debido a altos costos de cumplimiento.</i>                                     | Art. 2, 85         |
| <i>3. Transporte riesgoso de grandes volúmenes de PFV hacia instalaciones centralizadas.</i>                         | Art. 29-32         |
| <i>4. Obsolescencia normativa frente a nuevas tecnologías de paneles FV.</i>   | Art. 68-75         |

### 9.3 Análisis FODA del D.S. N.º 38/2005

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

| <b>FORTALEZAS</b>   | <b>Referencias</b> |
|---|--------------------|
| <i>1. Reconoce como peligrosos a contaminantes presentes en encapsulantes plásticos (EVA, PVC) que al incinerarse liberan dioxinas y furanos.</i> | Anexo C, Art. 5    |
| <i>2. Aplica a retardantes de llama bromados usados en recubrimientos y marcos de algunos paneles FV.</i>   | Anexo A y B        |
| <i>3. Controla los PCB que pueden encontrarse en transformadores e inversores antiguos asociados a sistemas FV.</i>                               | Anexo A            |
| <i>4. Exige gestión ambientalmente racional de vidrios y plásticos contaminados con COPs al final de vida.</i>                                    | Art. 6.1d          |
| <b>OPORTUNIDADES</b>  | <b>Referencias</b> |
| <i>1. Posibilidad de clasificar residuos de PFV con EVA, PVC o retardantes bromados como peligrosos, mejorando su trazabilidad.</i>               | Art. 6             |
| <i>2. Facilita financiamiento internacional para reciclaje de vidrio, aluminio y silicio evitando liberación de COPs.</i>                         | Art. 12–13         |
| <i>3. Impulsa investigación en nuevos encapsulantes sin halógenos para paneles FV.</i>  | Art. 11            |
| <i>4. Refuerza educación ambiental sobre el manejo de residuos FV con plásticos halogenados y PCB.</i>  | Art. 10            |
| <b>DEBILIDADES</b>  | <b>Referencias</b> |
| <i>1. No menciona explícitamente a los PFV; se aplica indirectamente a sus plásticos y equipos eléctricos.</i>                                    | Anexos A–C         |
| <i>2. Procesos de eliminación de PCB y plásticos halogenados son limitados en Chile, generando dependencia de exportación.</i>                    | Art. 6.1d          |
| <i>3. Requiere identificar qué lotes de paneles FV contienen COPs, información no siempre entregada por fabricantes.</i>                          | Art. 3             |
| <i>4. Costos de gestión para vidrios laminados, encapsulantes y cajas de conexión con COPs son elevados.</i>                                      | Art. 6             |
| <b>AMENAZAS</b>   | <b>Referencias</b> |
| <i>1. Acumulación de paneles FV con EVA, PVC o retardantes bromados podría liberar dioxinas si se incineran sin control.</i>                      | Anexo C            |
| <i>2. Riesgo de exportaciones ilegales de paneles FV con PCB o plásticos halogenados hacia países con bajo control.</i>                           | Art. 3.2 y 6.1d    |
| <i>3. Evolución tecnológica: nuevos materiales en PFV podrían contener aditivos bromados no listados aún como COPs.</i>                           | Art. 8             |
| <i>4. Incumplimiento en el control de componentes FV con COPs puede afectar la imagen de la energía solar como limpia.</i>                        | Art. 15–16         |

## 9.4 Análisis FODA de la Ley N.º 20.920

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

| <b>FORTALEZAS</b>  | <b>Referencias</b>            |
|--|-------------------------------|
| <i>1. Marco legal robusto y transversal para la gestión de residuos: Define principios como jerarquía de manejo, trazabilidad y responsabilidad del generador.</i>                 | Art. 1 y 2, pág. 1-2          |
| <i>2. Responsabilidad extendida del productor (REP): Permite exigir que quienes introducen productos en el mercado gestionen sus residuos.</i>                                     | Art. 9, pág. 6                |
| <i>3. Sistema de gestión trazable y auditado: Exige planes de gestión, auditorías externas e inscripción en el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC).</i> | Art. 22 y 37, pág. 9 y 14     |
| <i>4. Faculta al Ministerio del Medio Ambiente a incluir nuevos productos prioritarios (como los paneles solares) mediante decreto supremo.</i>                                    | Art. 10, inciso final, pág. 6 |
| <i>5. Fondo de apoyo al reciclaje con recursos públicos y privados: Puede financiar acciones de prevención y valorización.</i>   | Art. 31, pág. 12              |

| <b>OPORTUNIDADES</b>  | <b>Referencias</b>            |
|---|-------------------------------|
| <i>1. Posibilidad de incluir paneles FV como “aparatos eléctricos y electrónicos” vía decreto supremo.</i>                                | Art. 10, inciso 2 y 3, pág. 6 |
| <i>2. Marco adaptable y participativo, con espacio para consultas públicas, inclusión de recicladores y criterios de sustentabilidad.</i> | Art. 14 y 30, pág. 7 y 12     |
| <i>3. Programas de educación ambiental y financiamiento para iniciativas locales y municipales.</i>                                       | Art. 29-31, pág. 11-12        |
| <i>4. Facultades del Ministerio del Medio Ambiente para interpretar y actualizar los decretos supremos.</i>                               | Art. 18, pág. 8               |
| <i>5. Proyectos internacionales de cooperación o innovación tecnológica en reciclaje podrían apalancar su implementación.</i>             | Art. 31 letra a), pág. 12     |

| <b>DEBILIDADES</b>   | <b>Referencias</b>                    |
|--|---------------------------------------|
| <i>1. No inclusión explícita de paneles solares como producto prioritario, lo que impide aplicar directamente la REP a estos residuos.</i> | Art. 10, pág. 6                       |
| <i>2. Carencia de metas de recolección y valorización para los paneles solares, por no contar con decreto supremo específico.</i>          | Art. 12-13, pág. 7                    |
| <i>3. Dependencia de decretos posteriores para operativizar la ley, lo que ralentiza su implementación.</i>                                | Art. 14 y Transitorio 3º, pág. 7 y 17 |

4. Falta de normas técnicas específicas para desmantelamiento, transporte y tratamiento de paneles solares.

No especificado en artículos, implícito en vacíos normativos generales

5. Ausencia de protocolo sanitario o ambiental para residuos electrónicos de gran escala, como los módulos FV.

Art. 35, pág. 13

### AMENAZAS

### Referencias

1. Industria de paneles solares en crecimiento acelerado sin regulación específica para su fin de vida útil.

No abordado directamente, se deduce del Art. 10 y su omisión

2. Exportación informal de residuos electrónicos ante falta de infraestructura local.

Art. 8, pág. 5

3. Desconocimiento de los actores del sector solar sobre sus futuras obligaciones REP.

Art. 11 y 34, pág. 6 y 13

4. Lentitud legislativa en emisión de decretos y reglamentos necesarios.

Disposición transitoria 3ª, pág. 17

5. Riesgo ambiental y sanitario por acumulación o disposición inadecuada de módulos FV en vertederos comunes.

Art. 4 y 6, pág. 4

## 9.5 Análisis FODA del D.S. N.º 8/2017

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

### FORTALEZAS

### Referencias

1. Procedimiento transparente y participativo: Exige expediente público y accesible con todos los antecedentes, garantizando trazabilidad y legitimidad en la dictación de decretos.

Art. 2

2. Obligación de consulta pública y con organismos técnicos: Permite que actores de la industria solar, recicladores, municipios y ciudadanía participen en la elaboración de decretos sobre PFV.

Arts. 9 y 10

3. Análisis de impacto económico y social (AGIES): Obliga a evaluar costos y beneficios de la regulación, lo que permite estimar impactos del reciclaje de PFV antes de fijar metas.

Art. 7

4. Metas graduales y revisables: Las metas de recolección y valorización deben ser progresivas y revisadas cada 5 años, facilitando adaptación a la curva de residuos FV.

Arts. 19 y 35

5. Definición de productores y sistemas de gestión autorizados: Clarifica las responsabilidades de importadores, distribuidores y fabricantes de PFV bajo REP.

Arts. 22 y 38

## **OPORTUNIDADES**

- 1. Inclusión de PFV como subcategoría de AEE: El DS 8 permite que el MMA incorpore paneles solares como producto prioritario mediante decreto supremo específico.*
- 2. Espacio para cooperación internacional: El procedimiento fomenta la incorporación de experiencias técnicas extranjeras y mejores prácticas en el reciclaje FV durante la consulta y el AGIES.*
- 3. Flexibilidad en obligaciones asociadas: Posibilidad de establecer requisitos diferenciados como etiquetado, ecodiseño y separación en origen para los PFV.*
- 4. Participación de recicladores y municipios: El comité operativo ampliado incluye recicladores de base y gobiernos locales, facilitando la integración de cadenas de recolección FV.*
- 5. Ajuste a realidades tecnológicas: El DS exige considerar mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, lo que favorece innovación en reciclaje de FV.*

## **Referencias**

|              |
|--------------|
| Art. 16      |
| Arts. 7 y 9  |
| Art. 20      |
| Art. 9       |
| Art. 19 y 37 |

## **DEBILIDADES**

- 1. No regula directamente a los PFV: El decreto es procedimental, por lo que la inclusión de los paneles solares depende de un futuro decreto sectorial.*
- 2. Demora en emisión de decretos específicos: El proceso es complejo y puede tardar años en transformarse en metas concretas, lo que retrasa la gestión de residuos FV.*
- 3. Alta dependencia administrativa: El avance depende de la coordinación del MMA y del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad.*
- 4. Carencia de normas técnicas específicas para PFV: No define protocolos de desmantelamiento, transporte o valorización de paneles.*
- 5. Carga inicial para productores e importadores de PFV: Los sistemas de gestión deben presentar planes detallados y garantías financieras, lo que podría dificultar a empresas pequeñas.*

## **Referencias**

|                 |
|-----------------|
| Art. 16         |
| Arts. 5, 8 y 23 |
| Arts. 13 y 32   |
| Implícito       |
| Arts. 40 y 48   |

## **AMENAZAS**

- 1. Riesgo de acumulación de residuos FV: Si no se dicta a tiempo un decreto sectorial, el crecimiento exponencial de paneles generará pasivos ambientales.*
- 2. Falta de infraestructura de reciclaje FV en Chile: La obligación REP podría generar exportación informal si no se desarrollan plantas locales.*
- 3. Posibles conflictos legales: Productores podrían reclamar ante el Tribunal Ambiental en caso de considerar excesivas las obligaciones para PFV.*
- 4. Lentitud en actualización tecnológica: La revisión cada 5 años puede quedar rezagada frente a la rápida evolución de tecnologías FV y de reciclaje.*
- 5. Desconocimiento del sector solar: Falta de preparación de actores de la industria sobre sus futuras responsabilidades bajo REP.*

## **Referencias**

|                  |
|------------------|
| Arts. 16 y 35    |
| Art. 20 letra e) |
| Arts. 15 y 34    |
| Arts. 35-37      |
| Art. 22          |

## 9.6 Análisis FODA del R.E. N.º 3.413/2025

El presente FODA se encuentra enfocado a su aplicación en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

### **FORTALEZAS**

1. Inclusión de PFV como producto prioritario regulado, con metas obligatorias de valorización (10% al año 3, 50% al año 10).
2. Definición de categorías diferenciadas: AIT, PFV y otros AEE.
3. Uso de la distribución de Weibull para estimar generación de residuos de PFV.
4. Flexibilidad en la valorización de PFV (reciclaje, reutilización, coprocesamiento).
5. Modelo de financiamiento de largo plazo para cubrir costos futuros de PFV.
6. Cobertura nacional obligatoria con puntos de acopio, recolección domiciliaria y grandes comercios.
7. Participación de múltiples actores: recicladores de base, municipalidades, consumidores industriales.
8. Sistema de control y trazabilidad con reportes, auditorías y RETC.
9. Alineamiento con convenios internacionales (Basilea, Estocolmo, entre otros).
10. Limitación a presencia de mercurio y cadmio en pilas importadas.
11. Exclusión de Microempresas (productores) en el cumplimiento de metas de recolección y valorización, protegiendo el desarrollo.

### **Referencias**

|                  |
|------------------|
| Art. 25          |
| Art. 4           |
| Art. 26          |
| Art. 28          |
| Art. 19          |
| Arts. 30-33      |
| Arts. 44-46      |
| Arts. 16, 37, 39 |
| Considerando 40  |
| Art. 43          |
| Considerando 31  |

### **OPORTUNIDADES**

1. Desarrollo de industria nacional de reciclaje de PFV (90% del peso valorizable).
2. Generación de empleo verde en reciclaje, logística inversa y reacondicionamiento.
3. Impulso a la innovación tecnológica en separación de materiales críticos (silicio, plata, telurio).
4. Incentivo a diseños sustentables mediante modulación de tarifas.
5. Formalización de recicladores de base mediante planes de capacitación.
6. Fortalecimiento de la economía circular en el sector energético.
7. Mayor cooperación público-privada en la gestión de residuos.
8. Cumplimiento de compromisos OCDE.
9. Atracción de inversión extranjera en plantas de reciclaje PFV.
10. Educación ambiental y concientización ciudadana obligatoria.
11. Impulso a Startups relacionadas a dar una segunda vida a los PFV.

### **Referencias**

|                 |
|-----------------|
| Considerando 24 |
| Considerando 2  |
| Arts. 28, 38    |
| Art. 18         |
| Art. 44         |
| Considerando 2  |
| Arts. 30, 45    |
| Considerando 5  |
| Considerando 24 |
| Arts. 11.c, 34  |

## **DEBILIDADES**

1. Alta incertidumbre en flujos de residuos PFV por su vida útil prolongada.
2. Escasa infraestructura nacional para valorización de PFV (específicas).
3. Complejidad administrativa y altos costos de cumplimiento REP.
4. Ausencia de valorización mínima para PFV. La existente es de 75% de valorización de forma general.
5. Relación beneficio/costo desfavorable (AGIES: 0,64). Materiales de bajo valor comercial.
6. Desigualdad en costos: PFV más caros de gestionar que otros AEE.
7. Dificultad en la trazabilidad de PFV importados.
8. Dependencia tecnológica internacional para reciclaje avanzado.
9. Fiscalización limitada de la Superintendencia.
10. Falta de normativa que articule institucionalmente a los actores (MMA, Aduana, Ministerio de Salud, Org. Internacionales, municipalidades, colectores base, entre otros).
11. Sistema de control y trazabilidad con reportes, auditorías y RETC complejos.
12. Disonancia institucional, pues las preocupaciones de la autoridad de competencia no siempre han estado alineadas con los objetivos de la autoridad ambiental.
13. Poca tecnología local.
14. Altos costos iniciales de implementación.
15. No limita las concentraciones máximas de sustancias peligrosas en los PFV.
16. No exige clasificación de peligrosidad según composición de panel y tampoco exige información de reciclaje.

## **Referencias**

|                  |
|------------------|
| Considerando 25  |
| Considerando 27  |
| Arts. 6, 11, 17  |
| Art. 39          |
| Considerando 45  |
| Art. 18          |
| Considerando 25  |
| Considerando 25  |
| Art. 48          |
|                  |
| Arts. 16, 37, 39 |
|                  |
|                  |
|                  |
| Art 36, 43       |
| Art 36, 43       |

## **AMENAZAS**

1. Resistencia de la industria solar a los costos REP.
2. Riesgo de distorsión de mercado: priorizar residuos fáciles frente a PFV.
3. Competencia desleal de importadores informales.
4. Inestabilidad del mercado de importación de PFV.
5. Dependencia de exportación de residuos bajo Basilea.
6. Traslado de costos REP a consumidores finales.
7. Acumulación de PFV en rellenos sanitarios si no se cumplen metas.
8. Falta de cultura de reciclaje en Chile.
9. Posibles conflictos con otras normativas (DS 148/2003, tratados internacionales).
10. Vulnerabilidad económica por fluctuación de precios de materiales reciclados.
11. Riesgo de retraso en implementación (24 meses hasta entrada en vigencia).
12. Incumplimiento de metas por procesos lentos.
13. Falta de mercado para los productos procesados.

## **Referencias**

|                          |
|--------------------------|
| Considerando 31          |
| Considerando 34, Art. 10 |
| Considerando 25          |
| Considerando 25          |
| Art. 29                  |
| Art. 18                  |
| Considerando 29          |
| Considerando 5           |
| DS 148/2003              |
| Considerando 45          |
| Art. 50                  |
|                          |
|                          |

## 9.7 Tabla de Benchmarking comparativo

| N° | Punto comparativo  | Alemania   | Francia  | Japón  | Chile ante nuevo Decreto Supremo   |
|----|--|--|--|--|--|
| 1  | Inclusión en ley REP.  | Los PFV están dentro del régimen RAEE (ElektroG, trasposición de WEEE); productores deben registrarse en Stiftung EAR (Fundación Registro de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) y asumir obligaciones de gestión.   | Los PFV están en REP con eco-organismo único (SOREN) aprobado por el Estado para la recolección y tratamiento.   | No existe REP específico para PFV; se gestionan bajo la Ley de Gestión de Residuos (Waste Management Act).   | Marco REP: Ley 20.920; la Res. Ex. 3413/2025 aprueba la propuesta de DS que incorpora PFV dentro de P+AEE con obligaciones y metas.  |
| 2  | Protocolos de manejo, transporte y disposición final para PFV. | Requisitos técnicos de tratamiento en la EAG-BehandV (extracción de componentes, separación y preparación para reciclaje) y plantas certificadas. Norma EN 50625-2-4, establece requisitos específicos de recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento de módulos FV al final de su vida útil. | Tratamiento mediante operadores aprobados y coordinado por SOREN (logística, contratos y trazabilidad). Norma EN 50625-2-4, establece requisitos específicos de recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento de módulos FV al final de su vida útil.   | Manejo conforme a guías y exigencias de la Waste Management Act; sin obligación nacional de reciclar, aunque existen lineamientos y proyectos.   | No tiene protocolos específicos para PFV.  |
| 3  | Normas técnicas específicas para PFV.                          | Ordenancita de tratamiento EAG-BehandV (2021) y guías UBA para primeras plantas de tratamiento. Norma EN 50625-2-4, establece requisitos específicos de recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento de módulos FV al final de su vida útil.   | Requisitos de tratamiento bajo REP con control público (ADEME/SOREN). Norma EN 50625-2-4, establece requisitos específicos de recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento de módulos FV al final de su vida útil.   | No tienen normas técnicas. Ministerio del Medio Ambiente (MOE), publicó Guías para promover el reciclaje y manejo adecuado del fin de vida de sistemas fotovoltaicos (Guidelines for Promoting PV System Recycling (Second Edition)). NEDO también publica guías técnicas. | No existe.   |
| 4  | Control transfronterizo.                                       | Sujeto al Reglamento (UE) 2024/1157 de traslados de residuos y al Convenio de Basilea. Los residuos deben declararse como peligrosos o no peligrosos. Límites obligatorios de sustancias peligrosas en PFV nuevos vía RoHS. En la UE, un panel fotovoltaico que se                                   | Sujeto al Reglamento (UE) 2024/1157 de traslados de residuos y al Convenio de Basilea. Los residuos deben declararse como peligrosos o no peligrosos. El eco-organismo exige a sus operadores certificados de que las fracciones cumplen los límites de metales pesados o, si no, se declaran como | Control por la Basel Act (1993) japonesa que implementa Basilea. La autorización de exportación, se debe entregar información suficiente para determinar si un residuo es peligroso. CSCL – Chemical Substances Control Law controla la                                    | Chile aplica el Convenio de Basilea para movimientos transfronterizos (marco general). Residuos de PVF deben tratarse como peligrosos. No hay restricciones de metales pesados para PFV nuevos que ingresan al país. |

|   |                 |   |   |  |  |
|---|-----------------|---|---|--|--|
|   |                 | <p>exporta solo puede declararse como “usado” y no como residuo si cumple estrictos requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Certificado de funcionalidad (test eléctrico y estado físico).</li> <li>• Documentación contractual que pruebe su reutilización.</li> <li>• Declaración del productor/importador.</li> </ul> <p>De lo contrario, se considera residuo y su exportación queda sujeta al Convenio de Basilea y al Reglamento (UE) 2024/1157.</p> | <p>peligrosas. Límites obligatorios de sustancias peligrosas en PFV nuevos vía RoHS.</p> <p>En la UE, un panel fotovoltaico que se exporta solo puede declararse como “usado” y no como residuo si cumple estrictos requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Certificado de funcionalidad (test eléctrico y estado físico).</li> <li>• Documentación contractual que pruebe su reutilización.</li> <li>• Declaración del productor/importador.</li> </ul> <p>De lo contrario, se considera residuo y su exportación queda sujeta al Convenio de Basilea y al Reglamento (UE) 2024/1157.</p> | <p>fabricación e importación de productos que contengan sustancias químicas peligrosas. Si un módulo FV contiene cadmio, plomo, mercurio u otras sustancias reguladas, el importador debe notificar y demostrar cumplimiento antes de comercializarlo.</p> |  |
| 5 | Trazabilidad.   | <p>Registro y declaraciones de productores ante Stiftung EAR; obligación de reporte bajo ElektroG. Panel debe estar marcado con símbolo de reciclaje y con identificación del productor.</p>  | <p>Registro en SYDEREP/ADEME y trazabilidad a través del eco-organismo SOREN. Panel debe estar marcado con símbolo de reciclaje y con identificación del productor.</p>   | <p>Sistema de “manifiesto” (paper/e-manifest) introducido por el Waste Management and Public Cleansing Act, que exige que cada panel o lote recolectado tenga un documento de trazabilidad hasta su tratamiento final. No es obligación marcar PFV.</p>    | <p>Ley 20.920 (REP, 2016): establece la trazabilidad de productos prioritarios a través del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC). DS 148/2003: exige declaración y seguimiento en el SIDREP para residuos peligrosos (PFV con metales pesados). Res. Ex. 3413/2025 (proyecto DS P+AEE): incorpora a los PFV como producto prioritario, obligando a la trazabilidad desde que se ponen en el mercado hasta su valorización/disposición.</p> <p>No es obligación marcar PFV.</p> |
| 6 | Metas para PFV. | <p>Metas mínimas de preparación para reutilización y reciclaje:</p> <p>75 % valorización y 55 % reciclaje para equipos</p>  | <p>Cahier des charges (2021, art. 3.2): Valorización mínima de PFV: 87 %. Reciclaje y preparación</p>   | <p>No existen cuotas obligatorias de recolección/reciclaje para PFV.</p>   | <p>10% de los residuos en peso en tercer año y 50% en décimo año.</p>  |

|   |   |  |   |   |   |
|---|---|--|---|---|---|
|   |   | de la categoría 5 y 6 (donde están los PFV).   | para reutilización (PFV): 82 %  |   |   |
| 7 | Clasificación de residuo fotovoltaico.        | La EAG-BehandV (2021) exige la separación obligatoria de tecnologías en el tratamiento: Silicio cristalino (Si). Módulos de capa fina (CdTe, CIGS, CIS).   | Obligación práctica. Cahier des charges de SOREN (2021) establece que los operadores deben diferenciar entre módulos de silicio y de capa fina para asegurar procesos adecuados. SOREN debe hacer estudios específicos para identificar las materias críticas utilizadas en las células fotovoltaicas.                                | Recomendado por MOE (Ministerio de Medio Ambiente) en sus guidelines de 2016 y 2021 recomienda la separación de tecnologías, porque los módulos de capa fina (CdTe, CIGS) pueden ser clasificados como Specially Controlled Industrial Waste. | No existe distinción entre tipos de paneles fotovoltaicos.  |
| 8 | Requisitos sanitarios o ambientales para PFV. | ElektroG (2015, reformada 2021): establece obligaciones ambientales de recogida y tratamiento de RAEE, incluidos PFV. EAG-BehandV (2021): fija requisitos técnicos de tratamiento: separación de tecnologías, extracción de marcos y cajas de conexión, límites de metales pesados en fracciones recicladas. Ley de Economía Circular (KrWG): marco ambiental general de residuos. | Code de l'Environnement (art. L.541-1-1, R.543-172 y ss.): establece jerarquía de residuos, requisitos ambientales y REP para PFV. Loi AGECE (2020): obliga a eco-organismos (SOREN) a garantizar trazabilidad y reciclaje ambientalmente seguro. Cahier des charges de SOREN (2021): detalla obligaciones ambientales de operadores. | Waste Management Act + manifiestos y controles locales; sin obligación nacional de reciclar. Sus leyes no son explícitas para PFV.  | Ley 20.920 (REP, 2016): crea régimen de gestión ambiental para productos prioritarios, incluyendo PFV vía el nuevo DS P+AEE. Res. Ex. 3413/2025 (Proyecto DS P+AEE): incorpora a PFV en REP, fijando metas de recolección y valorización bajo requisitos ambientales del MMA. |
| 9 | Declaración de composición de PFV nuevos.     | No hay obligación específica de declarar composición química al introducirlos; aplica marco de sustancias (REACH) y obligaciones RAEE generales de composiciones máximas de metales pesados.   | No hay exigencia específica para PFV; AGECE amplía obligaciones de información ambiental del productor (transparencia), sin ser una declaración química detallada. Loi AGECE (2020): añade obligación de informar sobre durabilidad, reciclabilidad y presencia de sustancias peligrosas en productos eléctricos.                     | Sin obligación específica de composición para PFV bajo la ley vigente.  | Sin obligación específica de composición para PFV bajo la ley vigente.  |

|           |  |   |  |  |   |
|-----------|--|---|--|--|---|
| <b>10</b> | Financiamiento.                            | Los productores e importadores deben financiar:<br>La recogida, transporte y tratamiento de los PFV que pusieron en el mercado.<br>Un sistema de garantías financieras para cubrir los costos futuros de reciclaje. | Productores pagan una eco-contribución por cada módulo puesto en el mercado, canalizada a través de SOREN, el eco-organismo autorizado.<br><br>SOREN usa esos fondos para financiar:<br>Recolección gratuita para el usuario final.<br>Logística, tratamiento y reciclaje. | No tiene sistema REP. El financiamiento recae en el generador o propietario del módulo (empresa de energía, usuario final), que debe cubrir los costos de retiro y disposición.<br>El Estado, a través del MOE y la NEDO, financia proyectos de I+D y pilotos tecnológicos.  | Los productores e importadores deben financiar:<br>La recogida, transporte y tratamiento de los PFV que pusieron en el mercado.<br>Un sistema de garantías financieras para cubrir los costos futuros de reciclaje.         |
| <b>11</b> | Reutilización y mercado secundario de PFV. | Aplica principio de jerarquía de residuos.  | Aplica principio de jerarquía de residuos.   | El Ministerio de Medio Ambiente (MOE) ha emitido guías (2016, 2021) que recomiendan evaluar el reúso de módulos FV si mantienen más del 80 % de eficiencia original.   | Se reconoce la reutilización, pero no obliga a gestores a aplicar el principio de jerarquía de residuos.  |
| <b>12</b> | Sanciones y multas.                        | Multas altas por no inscribirse en registros o incumplir metas.   | Multas altas por no inscribirse en registros o incumplir metas.  | Sanciones administrativas por mal manejo de residuos.  | Multas según Ley REP y DS 148   |
| <b>13</b> | Paneles solares domiciliarios              | Los usuarios finales (incluidos hogares) están obligados a entregar los PFV en puntos de recogida municipales o a distribuidores cuando los reemplazan.<br>Está prohibido desecharlos con basura común o escombros. | Exigen que los usuarios (particulares, empresas, entidades sociales) entreguen los PFV al sistema REP gestionado por SOREN.<br>La recogida es gratuita para el usuario final, financiada por la eco-contribución.  | No hay obligación en general.<br>Los propietarios (hogares o empresas) son responsables de decidir y costear su eliminación como residuo industrial o municipal.<br>El MOE (2016, 2021) recomienda que los municipios desarrollen esquemas de recogida diferenciada para PFV domésticos.<br>El costo recae igualmente en el propietario o en acuerdos con gobiernos locales. | Al ser producto prioritario, los productores/importadores deberán organizar sistemas de recolección obligatoria.<br>Eso significa que en el futuro los hogares estarán obligados a entregar PFV a sistemas REP autorizados. |

## 9.8 Tabla de Oportunidades de Negocio

| N° | Oportunidad de negocio                                 | Descripción  | Ventajas  | Desventajas  | Horizonte   | Beneficios esperados  |
|----|--|--|---|--|-------------|---|
| 1  | <b>Reciclaje básico (vidrio, aluminio y cobre)</b>     | Recuperación de materiales de fácil separación mediante procesos mecánicos simples.                                | Tecnología existente en Chile, mercado local para chatarra y vidrio, rápida implementación. | Margen económico limitado, precios del mercado volátiles, no recupera materiales estratégicos. | Corto plazo | Ingresos inmediatos, empleo local, reducción de disposición en rellenos.            |
| 2  | <b>Reciclaje avanzado de silicio</b>                   | Procesos químicos y térmicos para recuperar silicio de celdas FV y reutilizarlo en la industria solar/electrónica. | Valor agregado alto, clave para independencia tecnológica.                                  | Altísima inversión, no existe infraestructura en Chile, requiere I+D y know-how extranjero.    | Largo plazo | Asegura suministro estratégico, posiciona a Chile en cadena de valor solar.         |
| 3  | <b>Reciclaje avanzado de metales</b>                   | Extracción de metales presentes en capas conductoras (plomo, estaño, entre otros).                                 | Genera valor adicional y reduce peligrosidad de residuos.                                   | Procesos químicos complejos, costos elevados, clasificación de residuos peligrosos.            | Largo plazo | Ingresos por metales, reducción de impacto ambiental y sanitario.                   |
| 4  | <b>Reciclaje de metales raros (Ag, In, Te, Ga, Cu)</b> | Recuperación de metales escasos y estratégicos para nuevas tecnologías.  | Mercado internacional de alto valor, atractivo para exportación.                            | No hay plantas en Chile, requiere tecnología avanzada y cumplimiento ambiental estricto.       | Largo plazo | Potencial de exportación de insumos críticos, diversificación económica.            |
| 5  | <b>Reutilización y segunda vida</b>                    | Reventa de paneles usados con 60–80 % de rendimiento, para proyectos rurales o comunitarios.                       | Baja inversión, impacto social positivo, rápido de implementar.                             | Requiere certificación para generar confianza, riesgo de fallas tempranas.                     | Corto plazo | Energía asequible en zonas aisladas, extensión de vida útil, reducción de residuos. |
| 6  | <b>Servicios de certificación y trazabilidad</b>       | Generación de informes, sellos y plataformas de seguimiento exigidos por la Ley REP.                               | Obligatorio por normativa, barrera de entrada baja, oportunidad para software local.        | Depende de acreditación, mercado inicial reducido hasta masificación de REP.                   | Corto plazo | Transparencia regulatoria, cumplimiento normativo, confianza en mercado secundario. |
| 7  | <b>Logística inversa especializada en PFV</b>          | Recolección y transporte seguro de paneles desde parques solares o clientes hasta acopio/reciclaje.                | Demanda inmediata, puede integrarse con empresas logísticas ya activas.                     | Costos altos en distancias largas (Atacama–centros urbanos), requiere permisos ambientales.    | Corto plazo | Flujo constante de contratos con productores, empleo en regiones.                   |

|    |  |   |  |   |             |   |
|----|--|---|--|---|-------------|---|
| 8  | <b>Centros de acopio regionales</b>                    | Instalaciones para almacenamiento temporal, clasificación inicial y consolidación de PFV.   | Factible con bodegas existentes, adaptable a diferentes escalas regionales.                                      | Requiere permisos ambientales, gestión de residuos peligrosos, inversión en seguridad.          | Corto plazo | Base para reciclaje futuro, empleo local, reducción de disposición informal.  |
| 9  | <b>Servicios de desmontaje en parques solares</b>      | Retiro técnico y seguro de paneles FV en grandes instalaciones.   | Gran volumen asegurado, contratos estables con operadores solares.   | Alta competencia, requiere capacitación técnica y coordinación con operaciones y mantenimiento. | Corto plazo | Nuevo nicho de negocio para instaladores, prevención de disposición inadecuada.   |
| 10 | <b>Puntos limpios y recolección domiciliaria</b>       | Incorporación de paneles FV en redes de puntos limpios y reciclaje comunitario.   | Integra ciudadanía al sistema REP, fomenta cultura circular.   | Bajo volumen actual, costos de logística y almacenamiento elevados.                             | Largo plazo | Conciencia ciudadana, cumplimiento REP en sector residencial, inclusión social.   |
| 11 | <b>Recolección bajo contrato de instalación</b>        | Empresas instaladoras ofrecen retiro de paneles al final de su vida útil como parte del servicio.   | Diferenciación competitiva, fidelización de clientes, ingresos recurrentes.                                      | Requiere coordinación a largo plazo, gestión de contratos futuros.                              | Corto plazo | Formaliza la cadena de recolección, genera ingresos adicionales para instaladores.  |
| 12 | <b>Plataformas digitales de trazabilidad logística</b> | Software para seguimiento de paneles desde desmontaje hasta valorización.   | Escalable, integrable con MMA y sistemas REP, bajo costo marginal.   | Necesita integración con actores públicos y privados, inversión inicial en desarrollo.          | Corto plazo | Transparencia, datos para políticas públicas, eficiencia logística.   |
| 13 | <b>Servicios financieros y de inversión verde</b>      | Instrumentos financieros de largo plazo (fondos fiduciarios, seguros REP, leasing verde) que aseguren recursos para la gestión futura de PFV. | Capital disponible desde ahora, alineado con ciclo de vida de 25–30 años, atractivo para bancos y fondos verdes. | Requiere regulación clara, difícil estimar costos futuros, riesgo de mala gestión.              | Corto plazo | Garantiza financiamiento futuro, evita crisis cuando llegue el peak de residuos, atrae inversión internacional y da estabilidad al sistema REP. |

*Fuente: Elaboración propia.*

## 9.9 Tabla de posibles usos en segunda vida para paneles fotovoltaicos

| <b>Aplicaciones</b>   | <b>Principales ventajas</b>  | <b>Principales desventajas</b>  |
|---|--|---|
| <b>Reemplazo de módulos dañados.</b>  | Posibilidad de restablecer la instalación de forma sencilla.   | Dificultad para encontrar módulos casi idénticos, lo que incrementa significativamente los costos.  |
| <b>Reemplazo de módulos antiguos en una planta fotovoltaica para prolongar su operación más allá de los 20–25 años de diseño o ante bajo rendimiento.</b> | Reducción de costos.<br>Compatibilidad con racks y sistemas de montaje existentes.   | Eficiencia menor, vida útil restante reducida y garantías limitadas frente a módulos nuevos.  |
| <b>Reutilización de módulos defectuosos en una planta tras reparación in situ, con el fin de extender la vida útil de la instalación.</b>                 | Ahorro al evitar la compra de repuestos difíciles y costosos. Sin costos adicionales de desmontaje o transporte.   | Reparaciones limitadas por condiciones climáticas. Acceso complejo a módulos defectuosos dentro del sistema.  |
| <b>Instalación de módulos en nuevas plantas fotovoltaicas de escala comercial o de servicio público.</b>  | Menor costo de adquisición de módulos.   | Eficiencia y vida útil reducidas, garantías limitadas. Ahorro parcial ya que los módulos representan solo un tercio del costo total del sistema.                  |
| <b>Instalación de módulos en sistemas fotovoltaicos residenciales nuevos.</b>   | Reducción en el costo de módulos.  | Menor eficiencia, vida útil limitada, peor estética y menores garantías frente a paneles nuevos. Los módulos representan solo un 30% del costo total del sistema. |
| <b>Instalación en regiones en desarrollo para sistemas fotovoltaicos pequeños o medianos fuera de red (energía doméstica, baterías, riego, etc).</b>      | Menores costos que facilitan acceso a grupos de bajos ingresos. Menor exigencia en estética y garantías. Soluciones solares fuera de red reducen emisiones, amplían la electrificación rural y generan empleo local. | Eficiencia reducida, vida útil corta, escasa garantía o certificación. Limitaciones por falta de infraestructura y procesos para su disposición final.            |
| <b>Otras aplicaciones.</b>  | Bajo costo. Posibilidad de abrir mercado a usuarios que no pueden costear paneles nuevos.  | Vida útil reducida.   |

Fuente: (Strupeit et al., 2023).

## 9.10 Tabla de barreras de reutilización de los PVF

| Categoría                               | Barreras identificadas  |
|---|---|
| <b>Diseño y manufactura</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los módulos están diseñados para una sola vida útil, no para ser desmontados, reacondicionados o reciclados.</li> <li>- Innovaciones estéticas (ej. módulos negros integrados en techos) generan heterogeneidad en el stock reutilizable.</li> <li>- Nuevas generaciones de paneles más eficientes reducen atractivo de los reutilizados, sobre todo en espacios limitados donde se prioriza eficiencia por m<sup>2</sup>.</li> </ul>  |
| <b>Mercado y cadena de valor</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeños volúmenes de módulos disponibles para reutilización.</li> <li>- Escasa colaboración e intercambio de información en la cadena de suministro.</li> <li>- Sistemas de recolección y logística inversa poco desarrollados para manejar volúmenes a gran escala.</li> <li>- Falta de especificaciones claras para definir un 'módulo reutilizable' y su aptitud para venta de segunda mano.</li> <li>- Roles poco definidos en la cadena de valor (productores, instaladores, gestores).</li> </ul> |
| <b>Información</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de datos sobre fallas de módulos (tipos, tasas, rendimiento).</li> <li>- Incertidumbre sobre volúmenes futuros de residuos fotovoltaicos.</li> <li>- Ausencia de trazabilidad (registro, tarjetas de identidad de módulos).</li> <li>- Información insuficiente sobre calidad de los paneles reutilizados.</li> <li>- Normas de certificación y etiquetado insuficientes o inexistentes.</li> </ul>  |
| <b>Financiero</b>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulos reutilizados compiten con paneles nuevos más eficientes y baratos.</li> <li>- Altos costos de prueba, recertificación y separación de módulos reutilizables/no reutilizables.</li> <li>- Baja disposición de clientes a pagar una prima por circularidad y por módulos de segunda mano con garantía.</li> </ul>  |
| <b>Usuario / aceptación</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desconfianza en módulos de segunda mano por falta de estándares y especificaciones.</li> <li>- Dudas sobre rendimiento, fiabilidad y seguridad.</li> <li>- Garantías limitadas o nulas.</li> <li>- Preferencia de consumidores por módulos nuevos debido a estética, eficiencia y durabilidad.</li> <li>- Mayor atención requerida para módulos reacondicionados, como ocurre con otros productos de segunda vida.</li> </ul>  |
| <b>Político / Institucional / Legal</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de regulación que incentive la reutilización.</li> <li>- Ausencia de estándares técnicos/normativos para reacondicionamiento.</li> <li>- Falta de inspección sobre funcionalidad de módulos de segunda mano exportados.</li> <li>- Responsabilidades poco claras en caso de fallas de módulos reutilizados.</li> </ul>   |

Fuente: (Strupeit et al., 2023).

## 9.11 Análisis FODA de Modelo de Negocio de Segunda Vida para PFV

El presente FODA se encuentra enfocado en el Modelo de Negocio de Segunda Vida para PFV.

### **Fortalezas**

1. *Plataforma digital de trazabilidad y logística inversa que entrega transparencia y eficiencia.*
2. *Reducción de costos para clientes finales: paneles reutilizados entre 40–50% más baratos que nuevos.*
3. *Garantías técnicas que aumentan la confianza del mercado secundario.*
4. *Contribución directa al cumplimiento de la Ley REP (N.º 20.920)*
5. *Impacto ambiental positivo: disminución de residuos peligrosos y reducción de huella de carbono.*
6. *Potencial de electrificación rural y comunitaria a bajo costo.*
7. *Know-how replicable de experiencias internacionales (CIRCUSOL en Europa, Rexia en Japón).*

### **Oportunidades**

1. *Creciente volumen de módulos FV que llegarán al fin de vida útil en Chile hacia 2030–2040.*
2. *Programas públicos y subsidios (CORFO, Ministerio de Energía y Ministerio del Medio Ambiente).*
3. *Integración con programas municipales de reciclaje y puntos verdes.*
4. *Posibilidad de exportar paneles reacondicionados a países vecinos (Bolivia, Perú) con déficit de electrificación.*
5. *Avance de la economía circular en políticas nacionales (mayor presión a empresas para valorizar residuos).*
6. *Alianzas con universidades y centros de investigación para innovación en procesos de recertificación.*

### **Debilidades**

1. *Falta de infraestructura local para testeo, reacondicionamiento y reciclaje avanzado de PFV.*
2. *Escasa cultura de reutilización tecnológica en Chile, lo que puede generar resistencia inicial.*
3. *Dependencia de importación de equipos de diagnóstico y certificación.*
4. *Altos costos iniciales (CAPEX) en centros de acopio, talleres y logística inversa.*
5. *Mercado secundario poco desarrollado (riesgo de baja demanda en los primeros años).*
6. *Incertidumbre regulatoria sobre criterios técnicos para reutilización de módulos FV.*
7. *Limitado acceso a información sobre calidad, rendimiento y fallas de paneles retirados.*

### **Amenazas**

1. *Caída sostenida en los precios de módulos nuevos, lo que reduce la ventaja comparativa del mercado secundario.*
2. *Competencia desleal de paneles usados no certificados (mercado informal).*
3. *Resistencia de importadores de módulos nuevos, que podrían influir en la regulación.*

4. *Costos logísticos elevados debido a la geografía extensa y dispersión de proyectos solares en Chile.*
5. *Ausencia de normativa clara sobre responsabilidad en caso de fallas en módulos reacondicionados.*
6. *Baja disposición de clientes a pagar por circularidad si no existen incentivos o beneficios tangibles.*
7. *Riesgos de reputación en caso de fallas técnicas de paneles reutilizados sin estándares robustos.*