



Informe 2

Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil

Equipo de Proyecto

CLIENTE

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

In-Data

Jefe de proyecto	Cristóbal Muñoz
Consultor	Boris Manzano
Consultor	Cristián Yáñez

RIGK CHILE

Consultor	Nesko Kuzmicic Astorga
Consultora	Anne Biehl
Experto Internacional	Jan Bauer

Tabla de contenido

Acrónimos	3
1 Introducción	4
2 Alcances del Informe	6
3 Revisión de experiencia internacional	7
3.1 Retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de residuos de módulos FV	8
3.1.1 Recolección de residuos de módulos FV	8
3.1.2 Transporte	9
3.1.3 Almacenamiento	11
3.1.4 Tratamiento y separación de componentes de módulos FV	12
3.2 Precio de venta actual de materiales de residuos de módulos FV	22
3.3 Proceso de fabricación de módulos FV	24
3.3.1 Fabricación de módulos basados en silicio	24
3.3.2 Fabricación de módulos capa fina (CdTe)	29
3.4 Certificaciones existentes de reciclabilidad de módulos FV	32
3.4.1 Condiciones internacionales para la existencia de certificaciones	32
3.4.2 Certificaciones existentes.....	39
4 Normativa asociada a la gestión de residuos.....	44
4.1 Normativa ambiental aplicable a módulos FV en Chile	44
4.1.1 Descripción general Ley 20.920.....	45
4.1.2 Aplicabilidad a módulos FV	47
4.1.3 Otras normativas existentes y aplicables al tratamiento de módulos FV en Chile...	47
4.2 Normativa ambiental aplicable a módulos FV en otros países	49
4.2.1 Unión Europea.....	50
4.2.2 Alemania.....	56
4.2.3 España	65
4.2.4 Japón	67
4.2.5 Estados Unidos: Estados de California y Washington	69
4.3 Comparación con el caso chileno.....	72
5 Referencias.....	0

Acrónimos

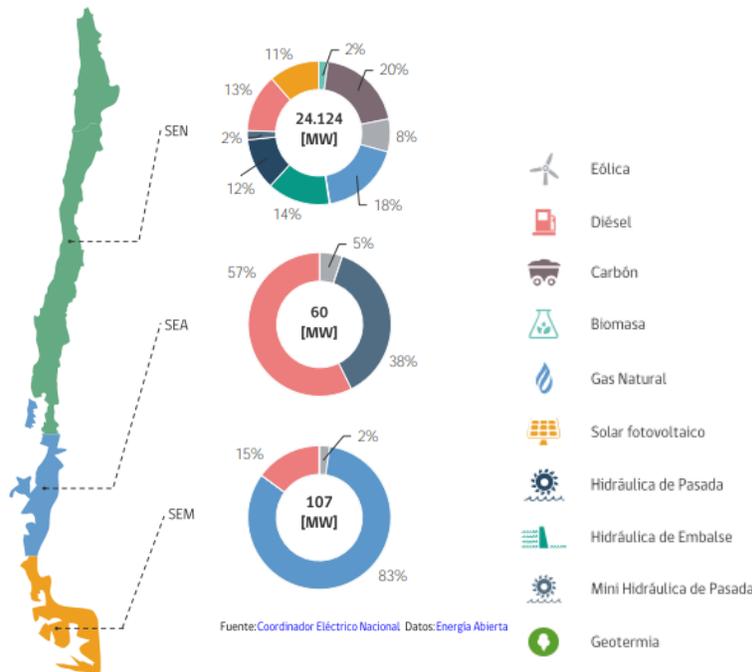
AEE	Aparatos Eléctricos y Electrónicos
CdTe	Teluro de Cadmio
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIGS	Cobre, Indio, Galio, Selenio
CNE	Comisión Nacional de Energía
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
EAR	Stiftung EAR- Fundación EAR: Elektro-Altgeräte-Register
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EVA	Etilvinilacetato
FIT	Feed-in tariff
FRELP	Full Recovery End Life Photovoltaic
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIS	Galio, Indio, Selenio
GW	Gigawatt
I+D	Investigación y desarrollo (R&D en inglés)
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
PELP	Planificación Energética de Largo Plazo
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
PMGD	Pequeños Medios de Generación Distribuida
PMG	Pequeños Medios de Generación
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
Si	Silicio
TFUE	Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea
örE	öffentlich rechtliche Entsorger (autoridades públicas de eliminación de residuos)

1 Introducción

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

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

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



¹ Fuente: (CNE, 2020)

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

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

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

Dado lo anterior, existe la posibilidad de que se tenga una cantidad tal de componentes por este ítem a nivel nacional, que hace necesario estudiar las distintas estrategias y acciones que deben tomar el país y que vaya en línea con los principios de la ruta energética 2018-2022, la Política Energética al 2050 y los compromisos internacionales anteriormente citados. Lo anterior, dada la regulación ambiental que se ha promulgado en los últimos años, sobre todo en lo que respecta a la Ley N°20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (conocida como Ley REP) por parte del Ministerio del Medio Ambiente. Esto con tal de que el despliegue de diversas tecnologías, en este caso los módulos fotovoltaicos, se realice siguiendo los más altos estándares socioambientales.

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

2 Alcances del Informe

El presente documento, corresponde al Informe 2 del estudio “Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil”. Esta entrega aborda las actividades asociadas a los objetivos específicos 2 y 3 de las bases técnicas, con respecto a “analizar la experiencia internacional en cuanto a la recolección y transporte de módulos fotovoltaicos, su valorización (reutilización o reciclaje), y tecnologías utilizadas” y a “conocer la normativa asociada a la gestión de los residuos identificados y caracterizados en el apartado 1) del numeral 2.2, en Chile y al menos 3 normativas internacionales y comparar con el marco normativo nacional”. Tales actividades son:

- Revisar la experiencia técnica internacional con respecto al retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de módulos fotovoltaicos, considerando tratamiento, soluciones normativas y técnicas en diferentes países donde se haya desarrollado. Al menos se deben considerar a lo menos 3 experiencias.
- Indicar el precio de venta actual de los materiales determinados en el apartado 1 del numeral 2.2, en mercados nacionales e internacionales. Este análisis debe llevarse a cabo considerando que la obtención de los elementos que puedan ser comercializados (como metales o equipos de segunda mano).
- Revisión de la fabricación actual de módulos fotovoltaicos y las tendencias para facilitar su manejo y posterior tratamiento.
- Revisar si existe alguna certificación o sello internacional que acredite que los módulos son reciclables y en qué medida.
- Describir las condiciones y requerimientos para realizar el transporte de los módulos fotovoltaicos, tanto de los camiones, como de embalajes, caminos, etc.
- Describir las condiciones y requerimientos para realizar un almacenaje de los módulos.
- Identificar los procesos y tecnologías utilizadas actualmente para la separación de cada elemento de un módulo fotovoltaico, costo unitario de extracción, y la cantidad estimada anual que se puede obtener.
- Detallar los componentes que, con las tecnologías descritas en el punto anterior, son actualmente rentables de extraer, y en qué proporción.
- Revisar la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), e identificar la aplicación de la misma para los equipos fotovoltaicos (módulos e inversores).
- Revisar la normativa ambiental vigente aplicable al manejo de módulos fotovoltaicos y sus componentes.
- Revisar la normativa internacional con respecto al retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de estos los elementos derivados de los paneles fotovoltaicos, tanto técnico como ambiental, en diferentes países donde se haya desarrollado. Al menos se deben considerar a lo menos 3 normativas.
- Comparar los resultados del punto anterior, con el marco normativo nacional, tal como la Ley REP, identificando mejoras y requisitos para su consideración en la normativa nacional.

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

3 Revisión de experiencia internacional

Según lo abordado en el primer informe de la consultoría, se espera que en el futuro exista una gran cantidad de módulos fotovoltaicos instalados en Chile (12,508,000 a marzo de 2020 según lo señalado en el Informe 1), principalmente aquellos en base a silicio. Esto pone en especial relevancia conocer la experiencia de otros países, en cuanto al retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de ellos, con la finalidad de sentar las bases de posibles estrategias y recomendaciones que Chile debe adoptar en el corto, mediano y largo plazo.

Principalmente, en este apartado se analizó cada tema realizando un levantamiento comparativo de la experiencia internacional (benchmarking) con énfasis en la experiencia de Alemania, España, Japón y EEUU. No obstante, se revisaron otras experiencias para temas puntuales, como por ejemplo las certificaciones existentes.

En resumen, la elección de tales experiencias se justifica principalmente por los siguientes puntos y análisis:



Alemania: Es el país que más gestión de residuos de módulos fotovoltaicos realizó en el mundo (7.740 toneladas). Es el 2° país en cuanto a penetración de energía fotovoltaica en la generación eléctrica total (7,9%)². Por otra parte, fue el país pionero en la fabricación e instalación de tecnología fotovoltaica en el mundo.

España: Es el 3° país en cuanto a gestión de residuos FV del mundo, sólo detrás de Alemania e Italia (1037 toneladas). España es el 10º país del mundo por potencia fotovoltaica instalada (5,6 GW)³. El caso de España también presenta un caso que es más asimilable a la realidad nacional, en tanto ha sido una referencia para otras normativas afines.



² Fuente: (IEA, 2020)

³ Fuente: (IEA, 2020)



Japón: El caso de Japón también es relevante ya que en 2016 publicó un roadmap que introduce los esquemas de recolección y manejo de módulos fotovoltaicos en desuso, así como también constituye una guía para el adecuado tratamiento y reciclaje de los módulos fotovoltaicos.

EE. UU. (California): Estados Unidos es el segundo país de mayor capacidad FV instalada (62 GW) en el mundo⁴. Si bien EE. UU. no tiene una normativa nacional, sí presenta iniciativas y leyes en algunos de los Estados Federales, como California (27 GW⁵) que son interesantes de evaluar para los objetivos del presente estudio.



3.1 Retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de residuos de módulos FV

3.1.1 Recolección de residuos de módulos FV

El criterio general que aplica a la recolección de módulos FV no es distinta a la de otros Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE). Básicamente se busca una recolección segregada de forma que puedan darse las condiciones óptimas para la preparación para la reutilización, el reciclado y el adecuado almacenamiento de las sustancias peligrosas⁶.

En la actualidad el principal mecanismo de recolección de paneles FV en Europa lo brinda PV Cycle, iniciativa sobre la cual se ahonda en los siguientes capítulos del informe. Este sistema recoge paneles fotovoltaicos, por ejemplo, desde puntos de generación de residuos separados y los transfiere a una ubicación más central donde se inicia el tratamiento y reciclaje de sus componentes. PV Cycle ofrece instalaciones de recolección en todos los estados miembros de la UE y en los países de la Asociación Europea, incluidos Islandia, Noruega, Suiza y Liechtenstein. Esta recolección y reciclaje es gratuito y

⁴ Fuente: (IEA, 2020)

⁵ Fuente: (Solar Energy Industries Association, 2019)

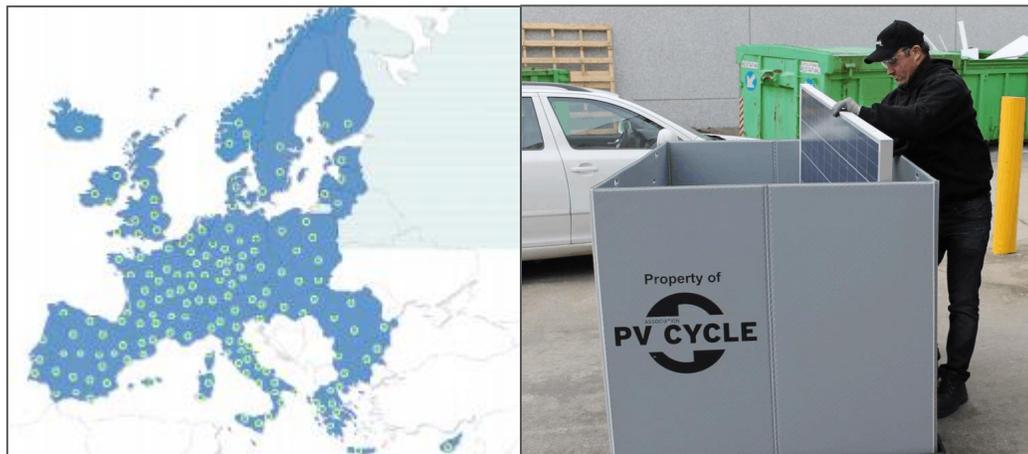
⁶ El Real Decreto 110/2015 de la Legislación española, en su Artículo 16 señala respecto al transporte separado de los residuos de AEE, señala: De manera especial se tomarán las medidas oportunas para la recogida separada de los aparatos de intercambio de temperatura con sustancias que agotan la capa de ozono y gases fluorados de efecto invernadero, de las lámparas fluorescentes que contienen mercurio, de los paneles fotovoltaicos y de los pequeños aparatos.

abierto a todos aquellos clientes que necesiten eliminar paneles FV de las marcas asociadas a PV Cycle, que representan el 90% del mercado de módulos FV en Europa.

El sistema PV Cycle de recolección de paneles FV al final de su vida útil consta de dos servicios diferentes, según las cantidades que se eliminen:

- **Servicio de recolección para pequeñas cantidades:** PV Cycle ofrece contenedores en los puntos de recogida situados en comercios de paneles fotovoltaicos minoristas y mayoristas o en contratistas de instalaciones eléctricas.
- **Servicio de recolección para grandes cantidades:** PV Cycle ofrece a las obras grandes de construcción, instalación y demolición un servicio de recolección adaptado a cada caso.

Figura 2. Puntos de recolección de PV Cycle en Europa y ejemplo de un contenedor de PV Cycle⁷.



3.1.2 Transporte

Los módulos FV, al igual que otros Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), están compuestos por numerosos componentes fabricados de diversos materiales que pueden incluir piezas metálicas, plásticas, componentes eléctricos y electrónicos, cristales, etc. Tal como se abordó en el Informe N°1 de la consultoría, básicamente se puede hacer una distinción entre metales férricos y no férricos, polímeros, vidrios, entre otros materiales, variando la cantidad de cada uno según el aparato que se trate.

Una vez que se ha alcanzado el fin de vida útil de los módulos FV y tras su desmontaje, se inicia el proceso logístico de transporte y almacenamiento, cuando corresponde. En general, la literatura

⁷ Fuente: (PV Cycle, 2020)

revisada no se detiene a analizar la problemática del transporte como un elemento especial o distinto del transporte de otros residuos asimilables, como residuos de AEE. Algunas de las consideraciones tomadas sólo se refieren a la distinción de si corresponden o no a residuos peligrosos, al costo logístico asociado al transporte del lugar de origen de los residuos y las plantas de reciclajes de módulos.

3.1.2.1 Peligrosidad en el transporte

No existe uniformidad de criterio respecto a la peligrosidad de los residuos de módulos FV. Hoy, tal como se abordó en detalle en el Informe N°1 de la consultoría, más de dos tercios de los paneles FV fabricados a nivel mundial son de silicio cristalino (c-Si). Normalmente están compuestos por más del 90% de vidrio, polímeros plásticos y aluminio, que se clasifican como residuos no peligrosos. Sin embargo, los mismos paneles también incluyen trazas de materiales peligrosos como plata, estaño y plomo.

Asimismo, tal como se revisó previamente en el estudio, los paneles de capa fina, en comparación, están constituidos en más de un 98% por vidrio, polímeros y aluminio no peligrosos, combinados con alrededor del 2% de cobre y zinc (potencialmente peligrosos) y semiconductores u otros materiales peligrosos. Estos incluyen indio, galio, selenio, cadmio, telurio y plomo. Los materiales peligrosos generalmente están sujetos a requisitos de tratamiento rigurosos con clasificaciones específicas según la jurisdicción.

La mayoría de los países del mundo clasifican los residuos de paneles FV como residuos generales o industriales. En casos limitados, como en Japón o los EE. UU., las regulaciones federales sobre residuos pueden incluir pruebas de peligrosidad para el contenido de materiales peligrosos, así como regulaciones específicas para el transporte, tratamiento, reciclaje y eliminación, sobre todo para el caso de módulos Capa Fina (CdTe).

En general, los cuidados especiales en el transporte de los paneles fotovoltaicos aplican sólo a aquellos que contengan sustancias peligrosas. Como se mencionó anteriormente, los paneles FV en base a silicio no se consideran peligrosos por lo que su transporte no difiere de otros residuos no similares como los de AEE. En el caso de los paneles de capa fina que contienen CdTe, en general sí son considerados residuos peligrosos por lo que se transportan en camiones autorizados, exclusivos para el transporte de residuos peligrosos.

Independiente de los aspectos normativos, a nivel científico existe una discusión respecto de si los paneles que contienen cadmio, un metal pesado considerado tóxico, son en efecto peligrosos para el medio ambiente y para la salud (NC Clean Energy Technology Center, 2017). Estudios científicos han demostrado que el telurio de cadmio difiere del cadmio libre debido a su alta estabilidad química y térmica. Si bien el cadmio es tóxico, los 7 gramos de cadmio de un panel de capa fina están en la forma telurio de cadmio, que tiene 100 veces menos toxicidad que el cadmio libre. El CdTe es un compuesto muy estable que no es volátil ni soluble en agua. Incluso en el caso de un incendio, la investigación muestra que menos del 0.1% del cadmio se libera cuando un panel de CdTe está expuesto al fuego. La investigación ha demostrado que la pequeña cantidad de cadmio en estos paneles no representa un riesgo para la salud o la seguridad (Fthenakis & Zweibel, 2017).

En resumen, los criterios de peligrosidad de los residuos de módulos FV que afectan el transporte de los mismos, dependen de cada país. Las normativas generales sobre residuos se basan en la clasificación de los residuos. Esta clasificación está conformada de acuerdo con la composición del residuo, particularmente con respecto a cualquier componente considerado peligroso. En Chile esto está normado por el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos DS N° 148. De su análisis se puede señalar que el cadmio y sus compuestos están en la Lista II.8, y que son considerados como peligrosos, a menos que se pueda demostrar ante la Autoridad Sanitaria que no presentan ninguna característica de peligrosidad. En el mismo reglamento se califica al cadmio dentro de la Lista A (*i.e.*, A1010), como residuo metálico peligroso.

3.1.2.2 Recomendaciones para el transporte

El transporte de los paneles fotovoltaicos, más allá del marco normativo que se aplica, requiere de un procedimiento que permita la trazabilidad y eficiencia logística.

El gremio de la Industria Solar de EEUU publicó una serie de recomendaciones que permiten un buen manejo de los paneles en cuanto a su transporte al final de su vida útil (Solar Energy Industries Association, 2019)⁸. Sus principales recomendaciones son:

- Proporcionar el número y las dimensiones de los pallets para asegurarse de que el tipo correcto de camión esté dispuesto para transportar los materiales a su destino.
- Se recomienda disponer los módulos en pallets siempre que sea posible para evitar que los módulos se muevan o caigan.
- Se recomienda apilar entre 28 y 35 módulos por pallets para un transporte más económico y para evitar más daños a los paneles.
- Si se apilan pocos módulos por pallet el espacio del camión no será el óptimo. Por el contrario, si se apilan demasiados módulos puede haber problemas con los paneles en movimiento, lo que podría aumentar el daño a los paneles o al vidrio del módulo o proporcionar dificultad para colocar el pallet en el camión debido a la altura.
- La carga promedio de los camiones que transportan módulos fotovoltaicos, es de entre 12 y 13 Pallets, lo que equivale a un peso promedio de la carga del camión entre 8 y 9 toneladas.

3.1.3 Almacenamiento

El almacenamiento de paneles fotovoltaicos es asimilable al almacenamiento de otros residuos de AEE. La normativa europea indica la necesidad de disponer de instalaciones adecuadas para el depósito y almacenamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, implicando en la recolección de estos a los distribuidores y entidades locales que tengan competencia en el manejo de residuos.

⁸ Corresponde a la asociación comercial nacional, sin fines de lucro, de la industria de la energía solar en los Estados Unidos fundada en 1974. En el año 2019, el gremio reportó al menos 1000 empresas miembros.

Disponer de un sitio de acopio o de almacenamiento transitorio muchas veces constituye un paso crucial previo al reciclaje. En este sitio se transfieren los residuos de los paneles FV al final de su vida útil, tanto para su acumulación y posterior traslado a plantas de separación o reciclaje, o para el primer tratamiento mecánico de separación de los componentes principales.

En caso de que exista daño o los paneles estén dañados, los residuos resultantes se disponen en grupos de materiales (por ejemplo, metales, mezcla de plásticos, vidrio, etc.). Este paso elimina potencialmente materiales peligrosos e impurezas que impidan el reciclaje.

3.1.4 Tratamiento y separación de componentes de módulos FV

Teniendo en contexto las características del proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos, se procede a realizar una revisión del proceso de tratamiento y separación de componentes de los módulos fotovoltaicos.

Al considerar el principio de jerarquía en el manejo de residuos, la recuperación de los materiales constituyentes de los módulos FV, es preferible a su eliminación en términos de impactos ambientales y eficiencia de los recursos. Su reciclaje implica una serie de beneficios económicos, ambientales y energéticos:

- Reducción de residuos en el medio ambiente
Reducción de las emisiones de GEI asociadas al consumo energético de la producción de paneles FV con materiales vírgenes (IEA, 2018)⁹.
- Uso de materia prima reciclada en la producción de módulos FV u otros procesos¹⁰.

Respecto al último punto, dada la duración de los paneles FV, el potencial reciclaje de materiales metálicos tiene una importancia en el largo plazo, en tanto asegura, en escenarios de escasez y encarecimiento, su disponibilidad para el futuro. Estudios recientes (IRENA, 2018) coinciden en que la disponibilidad de material fotovoltaico no es una preocupación importante a corto plazo, sin embargo, algunos materiales críticos pueden imponer limitaciones en largo plazo. Por otra parte, el aumento de los precios de algunos de estos materiales mejorará la factibilidad económica de las actividades de reciclaje e impulsará la inversión para más procesos de reciclaje más eficientes. Dentro de los materiales que se espera aumenten su precio y demanda se incluyen metales utilizados en el proceso de fabricación FV como plata, aluminio, cobre y estaño.

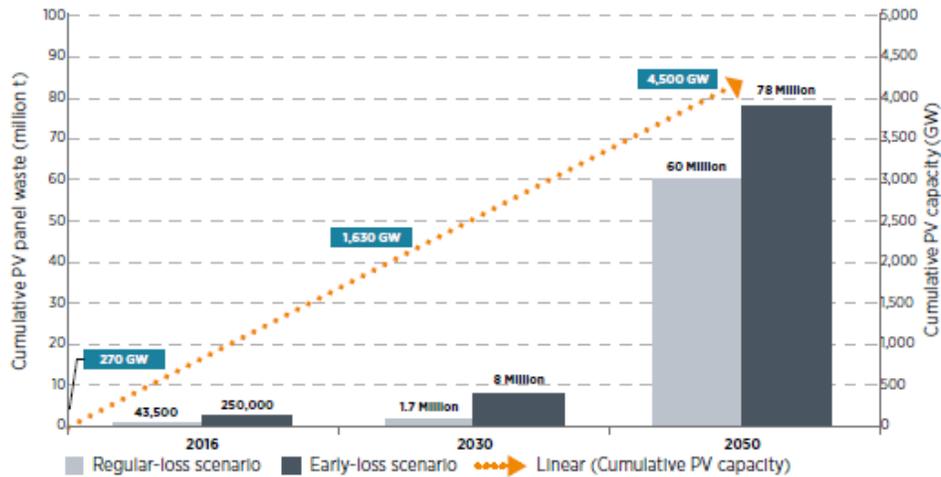
Cabe señalar que, en la actualidad, el reciclaje de módulos FV se centra más en casos de investigación y desarrollo por parte de algunos países de Europa, Asia y de los Estados Unidos, que en procesos de reciclaje a nivel industrial (Chowdhury, y otros, 2020). La principal razón de esto es que prácticamente la totalidad las plantas fotovoltaicas en el mundo están en operación y no se ha generado una masa residuos de módulos FV a gran escala todavía. En la Figura 3, se puede apreciar que incluso en el año 2030 la proyección de residuos FV en el mundo es reducida respecto a la

⁹ Esto podría ser particularmente significativo para las materias primas con altos niveles de impurezas (por ejemplo, material precursor de semiconductores), que a menudo requieren un tratamiento previo intensivo en energía para lograr los niveles de pureza requeridos.

¹⁰ Fuente: (IRENA, 2018)

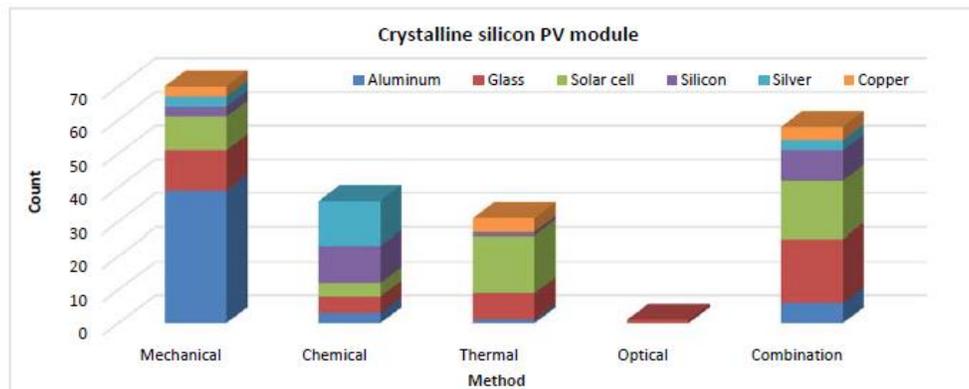
capacidad instalada proyectada. Lo anterior no significa que no existan iniciativas locales, o proyectos de reciclaje en desarrollo que sean prometedores (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**). Fuera de las experiencias de investigación, las iniciativas de reciclaje de paneles que presentan fallas o que se generan a nivel domiciliario han sido abordadas desde un enfoque local, en el flujo de otros tipos de residuos, principalmente RAEE.

Figura 3: Proyección de residuos FV en el mundo al final de su vida útil 2016-2050 en función de la capacidad FV instalada estimada por escenario de pérdida temprana (gris oscuro) y escenario de pérdida regular (gris claro)¹¹



En base a los proyectos y estudios desarrollados se pueden destacar tres tipos de procesos o tratamientos principales de reciclaje aplicados a paneles solares fotovoltaicos al fin de su vida útil: mecánicos, térmicos, químicos; además de la combinación de tratamientos (Figura 4, Figura 5).

Figura 4: Materiales recuperados para el reciclaje del módulo PV c-Si por método de procesamiento¹²



¹¹ Fuente: (IRENA, 2018)

¹² Fuente: (IEA-PVPS T12-10, 2018)

Figura 5. Resumen de métodos de tratamientos para el reciclaje de módulos fotovoltaicos de c-Si¹³



El proceso más difícil dentro en todo el proceso de reciclaje de los módulos FV es la separación o eliminación de los encapsulantes de las estructuras laminadas, por ejemplo, la separación de vidrio, polímeros, células de Si y otros metales, con el fin de recuperar los componentes que forman las células fotovoltaicas. Los enfoques para eliminar el encapsulante de las estructuras laminadas corresponden a tratamientos térmicos y químicos.

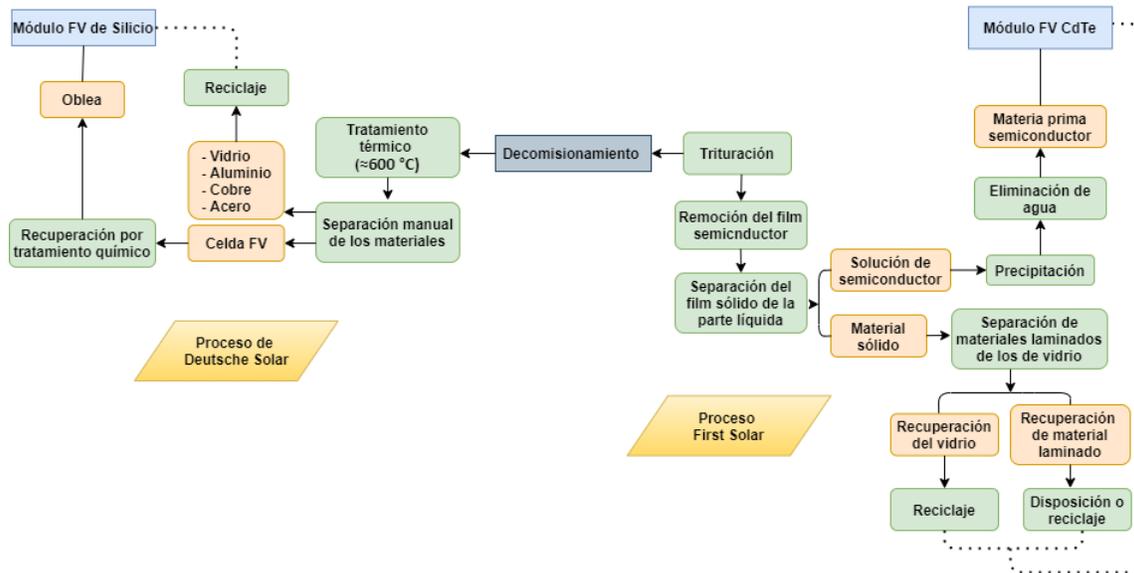
En los puntos siguientes se muestran distintos tratamientos utilizados dentro del reciclaje de los residuos de módulos FV. Debido a que en general estos tratamientos están asociados a investigación y desarrollo, se explican las distintas metodologías a través del estudio de casos o proyectos realizados.

3.1.4.1 Proceso de separación mecánica de componentes de módulos FV

La separación física consiste en el desmantelado de los paneles. Para la recuperación y el reciclaje de los materiales utilizados en los módulos fotovoltaicos, el primer paso es la separación de los componentes principales, como las estructuras laminadas, los marcos metálicos y las cajas de terminales (cables y polímeros). El aluminio o el acero de los marcos y el cobre de los cables pueden formar parte de los circuitos de reciclaje de metales ya establecidos y, por lo tanto, tienen el potencial para un reciclaje fácil. Después del proceso de desmantelado mecánico, el proceso más importante y técnicamente difícil implica la separación de estructuras laminadas que consisten en vidrio, células PV basadas en Si y capas de polímero.

¹³ Fuente: Adaptado de (IEA-PVPS T12-10:2018)

Figura 6: Esquema de reciclaje de los principales tipos de módulos fotovoltaicos.¹⁴



En este punto hay que hacer una distinción respecto a los métodos de desmantelamiento y posterior reciclaje de los módulos en base a silicio y los de capa fina. Como se puede apreciar en la Figura 6, el proceso de desmantelamiento de los módulos de CdTe y de paneles de silicio son diferentes.

3.1.4.1.1 Módulos basados en silicio

El proceso desarrollado por Deutsche Solar en 2003 implica calentamiento para separar los componentes plásticos del panel seguido de un proceso manual de recuperación de células solares, vidrio y metales o aleaciones, como Aluminio, Cobre y Acero. Las células solares se procesan químicamente para obtener nuevas obleas, que después de un procesamiento posterior representan la estructura primaria para la creación de nuevas células. Los otros materiales se envían a las operaciones de recuperación y reciclaje, tal como se observa en la Figura 6. Este proceso, ha permitido lograr altas tasas de recuperación del material (mayor a un 80% del total).

¹⁴ Fuente: Adaptado de (Sica, Malandrino, Supino, Testa, & Lucchetti, 2018)

Tabla 1: Composición de paneles fotovoltaicos a base de silicio cristalino ¹⁵

Material	Porcentaje
Vidrio, (contiene 0,01 - 1% de antimonio del peso del vidrio)	70%
Marco de Aluminio	18%
Conductor de Cobre	1%
Capa de encapsulación de adhesivo a base de polímero (EVA)	5,1%
Capa posterior (basada en fluoruro de polivinilo)	1,5%
Celda solar de silicio	3,56%
Plata	0,053%
Conductor de Aluminio	0,53%
Conductor interno de Cobre	1,14%
Metales varios (estaño, plomo)	0,053%
Total	100%

3.1.4.1.2 Módulos de capa fina (CdTe)

First Solar lanzó un programa de recolección y reciclaje para CdTe módulos en 2003, que entró en pleno funcionamiento en 2007. Utiliza un proceso de trituración de dos etapas, tal como se observa en la Figura 6. La primera etapa implica la ruptura superficial de los módulos para facilitar el transporte, y la segunda etapa reduce las placas de vidrio a pedazos pequeños (5 mm de diámetro) usando trituradoras de martillo. Las películas semiconductoras se someten a lixiviación, utilizando ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno, para obtener una solución semiconductor que, por precipitación, suministra un material que se subcontrata para el refinamiento y se utiliza para producir nuevos módulos capa fina CdTe.

El vidrio se separa primero de la solución de semiconductores y luego del laminado utilizado para unir las dos capas de vidrio. El proceso empleado por First Solar logra altas tasas de recuperación (90% para vidrio y 95% para material semiconductor) (First Solar, 2017), reduciendo notablemente el riesgo de daño ambiental asociado con la liberación de Cadmio en el medio ambiente.

3.1.4.2 Valorización

Existen varios proyectos (Tabla 2), en general desde un enfoque experimental, de reciclaje de paneles fotovoltaicos. En este punto se analizará los pasos más importantes del proceso de reciclaje,

¹⁵ Fuente: Adaptado de (Latunussa, Mancini, Blengini, Ardente, & Pennington, 2016)

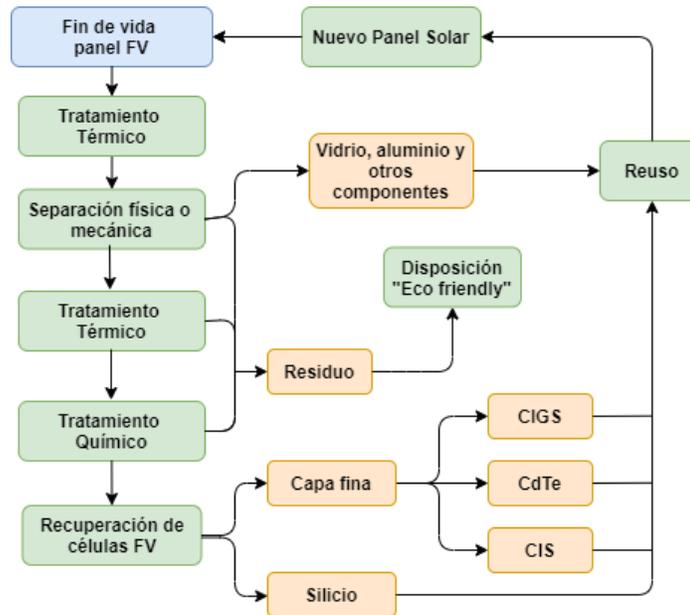
el balance de masa resultante y una algunas de las iniciativas más destacables. Algunos de los procesos de valorización se presentan en la siguiente figura.

Tabla 2: Ejemplos de proyectos de I&D de reciclaje de módulos FV¹⁶

PAÍS / REGIÓN	TÍTULO DEL PROYECTO	TIPO DE MÓDULO AL QUE APUNTA EL PROYECTO
JAPÓN	Desarrollo de la tecnología de reciclaje de módulos FV cristalinos	Silicio cristalino
	Desarrollo del reciclaje de alto valor de módulos FV cristalinos por medio del proceso húmedo	Silicio cristalino
	Tecnología de bajo costo de separación del vidrio en módulos FV	CIGS
KOREA	Recuperación y purificación de metales raros de módulos FV	Silicio cristalino
	Tecnología para la recuperación de silicio y metales valiosos de módulos FV al final de su vida útil	Silicio cristalino
	Tecnología para el reciclaje de módulos FV	Silicio cristalino
CHINA	Método térmico de reciclaje de módulos FV	Silicio cristalino
	Método mecánico de reciclaje de módulos FV	Silicio cristalino
	Proyecto FRELP	Silicio cristalino
EUROPA	Aparato móvil de reciclaje de módulos fotovoltaicos	Silicio cristalino
	Recuperación de Galio, Indio y tierras raras de módulos fotovoltaicos	CIGS

¹⁶ Fuente: Adaptado de (IEA, 2018)

Figura 7: Diferentes tipos de procesos de reciclaje FV.¹⁷



3.1.4.2.1 Tratamiento térmico

El proceso térmico generalmente se refiere al calentamiento o quema de algunos elementos, previo a la separación. Para ello deben disponerse los módulos sin triturar previamente en un horno de alta temperatura que trabaje en torno a 500°C y en una atmósfera inerte, pues el oxígeno favorece la combustión del EVA y, consecuentemente, la rotura de la célula fotovoltaica. Frente a esta situación, el uso de la silicona en el recubrimiento de las células puede favorecer la recuperación de éstas cuando se someten a este tipo de tratamientos de degradación térmica, pues facilitan la absorción de los impactos provocados por los gases procedentes de la descomposición del EVA.

En el horno, los componentes de polímero se queman / agrietan y los materiales restantes, como las celdas de Si, el vidrio y los metales, se separan manualmente. Entre los polímeros presentes en panel, los principales es el EVA, como encapsulante, y el Tedlar, como protección de la parte posterior del panel. Por lo general estos componentes no tienen un valor comercial en cuanto a recuperación de material, pero sí en cuanto a valorización energética, pues teniendo en cuenta el alto desgaste que sufren a lo largo de la vida útil del panel, lo habitual es que se sometan a un tratamiento térmico, del cual se obtiene una cierta cantidad de energía (IEA, 2018).

El vidrio y los metales retirados de los módulos se envían para su reciclaje. La carbonización causada por polímeros quemados puede prevenirse controlando la condición del horno.

¹⁷ Fuente: (Chowdhury, y otros, 2020)

3.1.4.2.2 Tratamiento químico

La opción de tratamiento químico consiste sumergir los módulos fotovoltaicos en un solvente, de forma que los componentes sean separados por reacciones químicas. En general, el enfoque químico requiere más tiempo que el enfoque térmico; sin embargo, el rendimiento de las células de silicio recuperadas sin daño es mayor en el enfoque químico que en el térmico.

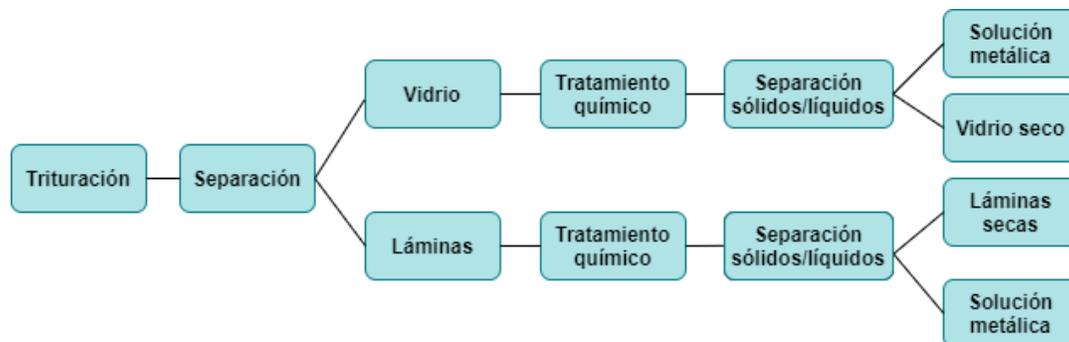
El principal uso del tratamiento químico es para la separación del vidrio de los elementos conductores.

BP Solar¹⁸, en la década de 1990 implicó el uso de ácido nítrico. Los módulos fotovoltaicos se sumergieron en el ácido nítrico y, después de un día, se disolvió la encapsulación de polímeros (EVA) y el vidrio, las células de Si y los metales fueron separados y recuperados.

Por otro lado, también existe un tratamiento químico que se aplica durante la fase final del proceso de recuperación de la célula, y que permite eliminar las impurezas metálicas presentes en la misma. Para ello, una vez se recupera la célula fotovoltaica, se procede a realizar un ataque químico sumergiéndola en una solución que contiene ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido acético (CH₃COOH) y agua destilada.

Loser Chemie (Palitzsch & Loser, 2014) ha desarrollado un proceso patentado para enriquecer el compuesto de metales semiconductores o plata de células solares mediante tratamiento químico después de que los paneles se trituran previamente, tal como se observa en la siguiente figura. La metalización del aluminio se puede utilizar posteriormente para producir productos químicos para el tratamiento de aguas residuales (óxidos de aluminio).

Figura 8: Proceso de reciclaje químico patentado por Loser Chemie¹⁹



¹⁸ Subsidiaria de British Petroleum que instala plantas fotovoltaicas en el mundo.

¹⁹ Fuente: (IRENA, 2016).

3.1.4.2.3 Recuperación del vidrio

En la mayoría de los casos, una vez que el panel se encuentra como desecho, los fragmentos de vidrio procedentes del mismo se trituran en trozos inferiores a 25 mm de diámetro.

Posteriormente, mediante un proceso de tamizado y soplado, se filtra el polvo generado como consecuencia del triturado, lo cual evita una alta volatilización al momento de introducirlo en el horno para su fusión. Luego, se elimina el polvo restante lavando las fracciones resultantes mediante un proceso de limpieza donde se emplea agua caliente y agitación. Finalmente, el compuesto resultante se separa mediante decantación y se seca antes de enviarse al horno para facilitar su posterior moldeado.

3.1.4.2.4 Tratamiento del aluminio

Los marcos de los módulos FV generalmente están hechos de aleaciones de aluminio y constituyen una fracción significativa del peso de los módulos FV de silicio. En general, la proporción del marco dificulta el tratamiento térmico o químico del panel completo (IEA-PVPS, 2018), privilegiándose en este caso un tratamiento mecánico exclusivo o seguido de otros métodos para el resto de los componentes.

Al igual que con el vidrio, el primer proceso es el triturado, donde el aluminio se reduce a pequeñas dimensiones. Luego, mediante un proceso de fusión, las fracciones trituradas se funden en un horno rotativo, donde se realizan una serie de tratamientos para mejorar su composición química. Las impurezas restantes son separadas mediante un proceso de desgasificación a través del cual se inyecta gas inerte, generalmente hexacloroetano, que eleva las impurezas a la superficie de la masa fundida.

Estas impurezas son retenidas finalmente mediante un proceso de filtración (filtro cerámico), y pueden tener aplicación en la mezcla que se utiliza en el asfalto y en el hormigón.

En última instancia, la fracción de metal resultante se cuela en lingotes o placas, obteniéndose un metal apto para la producción de nuevos artículos de aluminio.

3.1.4.2.5 Tratamiento de células fotovoltaicas

En lo que respecta a las células, los procedimientos de tratamiento pueden variar según la tecnología de construcción de estas, tal como se dio cuenta en la sección 3.1.4.1 del presente informe.

En el caso de los paneles de silicio su reciclaje es menos favorable que otras tecnologías más recientes ya que carecen de metales valiosos y los beneficios obtenidos por reciclaje son algo inferiores. Por otro lado, tenemos la tecnología de capa fina (CdTe y CIGS), donde elementos tales

como el telurio, indio o galio, considerados como metales valiosos, constituyen una garantía para los recicladores.

3.1.4.2.6 Proyecto Full Recovery End Life Photovoltaic (FRELP)

Este corresponde a un proyecto de investigación reciente financiado por la UE en asociación con PV Cycle Italia, titulado "Full Recovery End of Life Photovoltaic project – FRELP", con el objetivo de maximizar el reciclaje de los diferentes materiales de un panel fotovoltaico basado en silicio. El proyecto FRELP tiene como objetivo desarrollar un proceso de reciclaje innovador para los residuos de módulos FV cristalinos con el objetivo de maximizar la recuperación de todo el material.

Este método implica la combinación de varios métodos para recuperar los materiales componentes del panel FV. El esquema FRELP contempla la elección de una ubicación optimizada para la recolección y el reciclaje, cercana del lugar donde se originan los residuos fotovoltaicos.

El tratamiento consistente en procesos para la remoción de los marcos de aluminio y cajas de terminales para recuperar vidrio, quemar polímeros y recuperar metales de células de silicio y electrodos.

Primero, una máquina extrae el marco de aluminio y la caja de terminales del módulo fotovoltaico. Posteriormente, la estructura laminada se calienta a 90 ° - 120 °C mediante un calentador infrarrojo y la estructura se inserta en un molino de rodillos y equipos de cuchillas vibratorias. Con este equipo, el vidrio se separa y recupera.

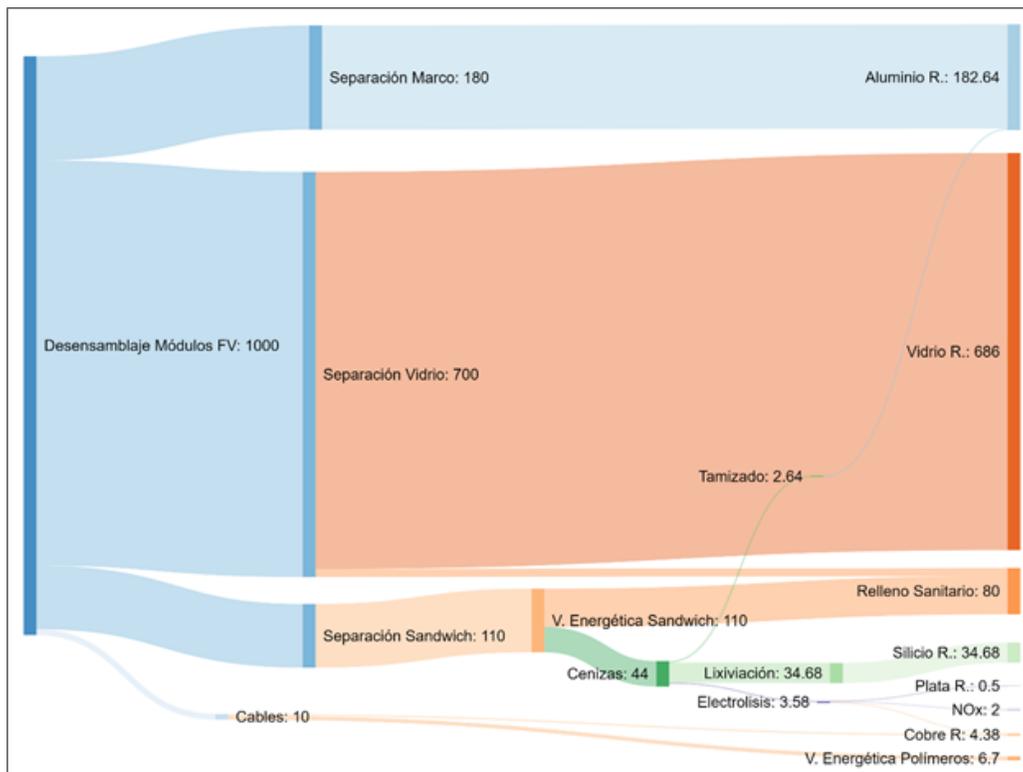
Durante el siguiente paso, la estructura restante que contiene la encapsulación, las células de silicio, los electrodos y la lámina posterior, se calientan de 500°C a 850°C, de forma tal que los metales presentes en las celdas y electrodos se separen. El gas residual de los polímeros plásticos incinerados se recupera en forma de combustión. Los metales separados son tratados luego por métodos químicos. Las células de silicio son lixiviadas con ácido nítrico recuperándose este material. Después de la lixiviación se realiza electrolisis y un tratamiento con hidróxido de calcio para recuperar otros metales como plata y cobre (IEA, 2018).

3.1.4.2.7 Balance de masa del proyecto FRELP

Un interesante caso en el que se realiza una prueba piloto de la metodología descrita en la sección previa fue desarrollado por (Latunussa, Mancini, Blengini, Ardente, & Pennington, 2016). En este estudio se realizó un análisis de ciclo de vida del proceso de reciclaje descrito anteriormente. Para el análisis se usó una unidad funcional de tratamiento de 1000 kg de residuos fotovoltaicos de silicio cristalino en una planta de reciclaje, en base a los procesos y tecnologías desarrollados en el proyecto FRELP.

Se utilizaron los datos de ese estudio para realizar un balance de masas de los distintos componentes recuperados y las vías por las cuales este reciclaje se produce, obteniendo el resultado expuesto en la siguiente figura.

Figura 9: Balance de masa de 1 tonelada de paneles FV reciclados mediante el método FRELP²⁰



Tal como se puede observar, del proceso de separación de un módulo fotovoltaico casi un 70% de la masa que se obtiene corresponde a vidrio reciclado, seguido de aluminio y materiales a disponer rellenos sanitarios.

3.2 Precio de venta actual de materiales de residuos de módulos FV

Los elementos valorizables de los módulos fotovoltaicos dependen de los mercados locales y globales de las materias primas resultantes de los procesos de separación y reciclaje, y de los costos asociados a la cadena de valor de la gestión de los paneles al final de su vida útil. De acuerdo con PV-Cycle, el 88% de los materiales que componen un panel FV son valorizables gracias a las tecnologías de reciclaje desarrollada hasta la fecha.

Como se ha descrito anteriormente, el principal material a extraer en cuanto a volumen corresponde a vidrio, metales y plásticos. Todos ellos presentan un valor en el mercado secundario. De acuerdo con el estudio de (Latunussa, Mancini, Blengini, Ardente, & Pennington, 2016), el

²⁰ Fuente: Adaptado a partir de datos de (Latunussa, Mancini, Blengini, Ardente, & Pennington, 2016)

destino de los principales componentes de los paneles fotovoltaicos es su comercialización, según lo que se indica en la siguiente tabla.

Tabla 3: Valorización de componentes asociados a os paneles FV²¹

MATERIAL	DESTINO FINAL
OBLEA DE SILICIO	Venta
GRANULADO DE SILICIO	Venta, uso propio
PLATA	Venta, reciclaje de metales
ALUMINIO	Venta, reciclaje de metales
ACERO	Venta, reciclaje de metales
COBRE	Venta, reciclaje de metales
VIDRIO	Venta, reciclaje de metales
EMPAQUE	Disposición, reciclaje
MATERIAL RESIDUAL	Disposición (residuos mixtos)

Tal como se mencionó, más del 80% del peso de los paneles de cualquier tecnología fotovoltaica es vidrio, por lo tanto, el desarrollo de las tecnologías de reciclaje eficientes para el vidrio de paneles FV son esenciales. En este sentido en el mercado de material secundario, el precio del vidrio reciclado en la Unión Europea fue en promedio para el año 2019 de 64 USD por tonelada, dependiendo de la recuperación y su calidad (Eurostat, 2020). En Chile el valor del vidrio reciclado es de aproximadamente 39 USD por tonelada.

El valor de algunos de los elementos de los paneles fotovoltaicos responde a las fluctuaciones de valor de las materias primas en el mercado internacional. Una actualización de tales valores se presenta en la Tabla 4.

²¹ Fuente: Adaptado de (Latunussa, Mancini, Blengini, Ardente, & Pennington, 2016)

Tabla 2. Valor por kg de materiales componentes de paneles FV.²²

Material	€/kg	CL\$	Fuente
Vidrio	0,05	49	(3)
Plástico	0,09	81	(1)
Aluminio	1,10	991	(1)
Cobre	5,46	4915	(2)
Cadmio	1,27	1144	(1)
Galio	183	164819	(1)
Indio	350	315228	(1)
Molibdeno	18,00	16212	(1)
Silicio	1,60	1441	(1)
Estaño	20,30	18283	(1)
Telurio	77,00	69350	(1)
Zinc	3,40	3062	(1)
Plata	0,43	390	(4)
Selenio	42,00	37827	(1)

3.3 Proceso de fabricación de módulos FV

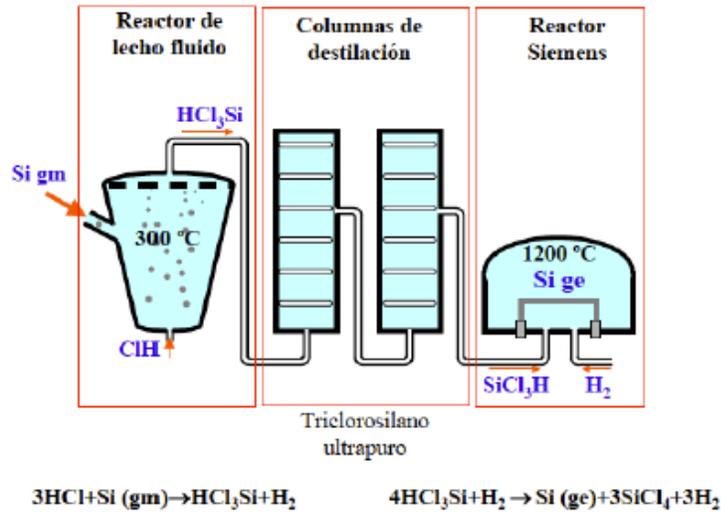
En base a los tipos de módulos descritos anteriormente y que existen en el mercado chileno (principalmente basados en Silicio y Capa Fina), a continuación, se expone un análisis del proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos, con sus respectivos métodos y etapas.

3.3.1 Fabricación de módulos basados en silicio

El silicio se obtiene principalmente de la sílice (óxido de silicio), de la que, por el método de reducción mediante hornos de arcos eléctricos, se extrae el silicio llamado de grado metalúrgico, que dispone de una pureza del 98%. Al no ser suficiente esta pureza para la fabricación de células FV, se debe volver a purificar mediante procesos químicos (siendo el más recurrente actualmente el Proceso Siemens) hasta el extremo de llegar a un valor del 99.9%. Así se obtiene el llamado silicio de grado electrónico, utilizado para la fabricación de células FV.

²² (1) (Sica, Malandrino, Supino, Testa, & Lucchetti, 2018)

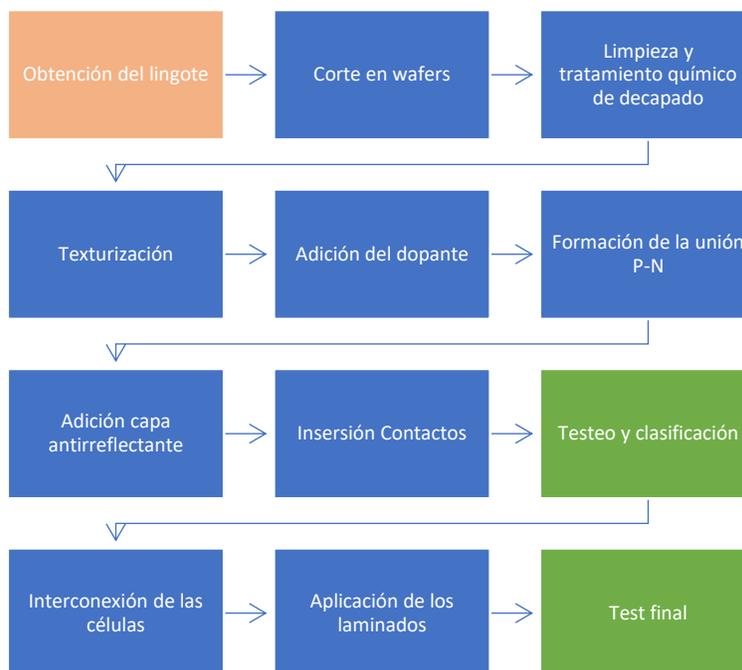
Figura 10. Proceso de purificación Siemens. (Fuente Barrera y otros, 2007)



Posterior a obtener el silicio de grado electrónico, este se somete a una secuencia de procesos para la fabricación de los módulos según se muestra en la siguiente figura.

Figura 11: Secuencia de etapas para la fabricación de módulos fotovoltaicos basados en Silicio²³

²³ Fuente: Adaptado de (Barrera, y otros, 2007)



A continuación, se describe de forma general cada una de estas etapas y los procesos que involucran.

3.3.1.1 Obtención del lingote

La obtención del lingote de silicio se realiza a partir de métodos de cristalización de este material, los cuales presentan leves diferencias en el caso de que el producto sea un módulo monocristalino o policristalino. Primero, para el caso de módulos monocristalinos se tiene:

- **Proceso Czochralski (CZ)**

Actualmente este método es el más recurrente que se utiliza para obtener los lingotes de silicio monocristalino. Consiste en fundir el silicio policristalino en hornos con crisoles de alta pureza de cuarzo, que rotan dentro de una atmósfera de argón a presión reducida, e ir formando el cristal mediante un cristal semilla que se pone en contacto con el silicio fundido y se va rotando en sentido contrario a la rotación del crisol cuarzo y elevando, a la misma vez, a una velocidad determinada arrastrando al silicio fundido que, al salir de la colada se va enfriando y cristalizando con la misma orientación que la semilla, dando lugar a un lingote monocristalino cilíndrico de diferentes diámetros y longitudes .

- **Proceso de Zona Flotante (FZ)**

Es el segundo método más recurrente de obtención de silicio monocristalino. Siendo de mayor interés para la fabricación de detectores de radiación de silicio. El silicio ZF presenta

valores de resistividad considerablemente más elevados que el silicio CZ. En este proceso, el anillo se va moviendo lentamente hacia arriba de manera que la zona fundida se desplaza a lo largo del lingote y el silicio va recristalizando en forma de monocristal. En este método de obtención de silicio monocristalino, el silicio no entra en contacto con ninguna sustancia que no sea la atmósfera (arazón o vacío) de la cámara de crecimiento. Al moverse la zona flotante, las impurezas disueltas no se incorporan en la misma concentración que tienen en el líquido, acumulándose en esta última fase.

Por otra parte, el método empleado para la cristalización del silicio en el caso de módulos policristalinos corresponde a:

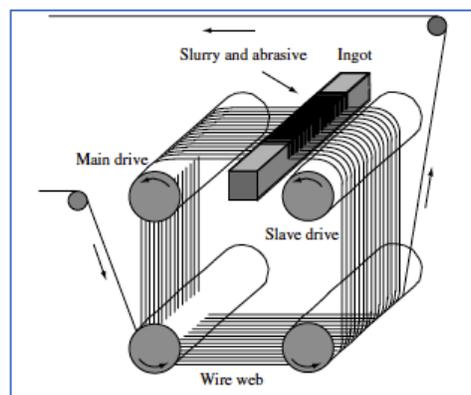
- **Procesos de fundición (DS, EMC)**

Con la necesidad de reducir costos e incrementar las tasas de producción en la industria fotovoltaica. La producción del silicio policristalino se realiza mediante la fundición del material a temperatura de enfriamiento controlada, permitiendo así que solidifique en una dirección determinada (DS) dentro del molde, normalmente de grafito/cuarzo y sección cuadrada. Este método tiene variantes en su aplicación, como el acoplamiento de un anillo inductor de corriente eléctrica (EMC), que permite un crecimiento de cristal más rápido.

3.3.1.2 Corte en Wafers

En esta etapa, el lingote de silicio se corta en finas obleas (wafers) (250-400 μm de espesor) con hilos de acero inoxidable de 150 hasta 500 μm . Para luego rociarlos con un abrasivo, lo que conlleva a una pérdida de 200-300 μm de espesor en forma de polvo inservible, perdiendo alrededor de un 50% del silicio de alta calidad.

Figura 12: Corte del Lingote en Obleas²⁴



²⁴ Fuente: (Barrera, y otros, 2007)

3.3.1.3 Limpieza y tratamiento químico de decapado

El corte mediante hilos de acero inoxidable de los lingotes en obleas provoca la presencia de restos, metálicos. Para pulir dichas imperfecciones se utilizan pulidoras con adición de ácidos con gran capacidad de disolver metales, como HCl, HNO₃ o combinaciones tipo HCl+H₂O₂. Una vez pulidas dichas imperfecciones, se procede a eliminar las posibles tensiones, irregularidades y defectos superficiales remanentes tras el corte en obleas. El proceso consiste en un decapado mediante inmersión de las obleas en una disolución acuosa de NaOH en caliente. El resultado es una mejora en los tiempos de vida de los portadores en la región del emisor próximo a la superficie, además de una ayuda en los tratamientos posteriores de texturización que requieren superficies muy lisas.

3.3.1.4 Texturización

Se basa en crear en la superficie unas micropirámides para conseguir disminuir las pérdidas por reflexión del 30 al 10% en el silicio, forzando a que se produzca una segunda absorción de la luz reflejada. La formación de las micropirámides se consigue atacando la superficie de las obleas cristalizadas en una orientación, con una disolución acuosa de NaOH y de KOH al 2%, dejando al descubierto los planos cristalográficos. Es importante mencionar que este proceso no aplica para obleas Poli-Si, debido a que no poseen una orientación definida.

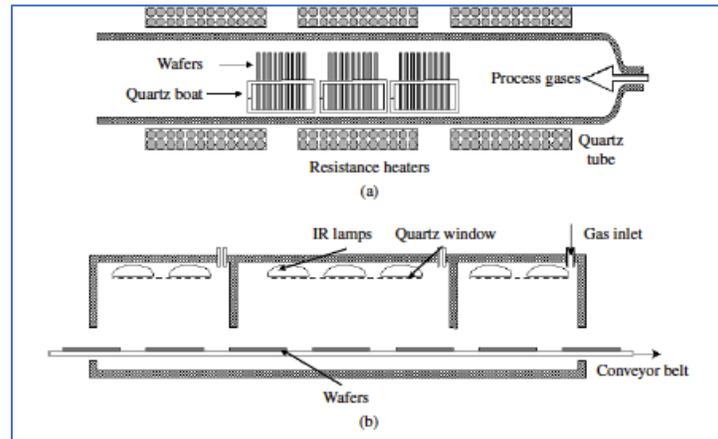
3.3.1.5 Adición del dopante

Previo limpieza de los posibles óxidos superficiales formados en las etapas anteriores, mediante inmersión en HF diluido, aclarado con agua y secado rápido, se procede a proyectar un dopante tipo N (el más comúnmente utilizado es el Fósforo) ya que las obleas suelen ser normalmente de tipo p debido a la introducción de Bromo antes de la etapa de cristalización. Dentro de los métodos más frecuentes para dopar las obleas, se encuentra; la serigrafía, la centrifugación y por fuente sólida, líquida o gaseosa.

3.3.1.6 Formación de la unión P-N

Una vez depositado el dopante sobre la superficie de la oblea, se debe inducir la sustitución de los átomos de silicio por los del dopante N en la red cristalina. Para ello, se introducen las obleas en hornos a altas temperaturas (900-1000 °C), añadiendo durante el proceso productos químicos como fuente adicional de fósforo: Oxiclорuro de Fósforo, Pentaóxido de Fósforo y Fosfina. Al final del proceso también se realiza normalmente una limpieza mediante baños ácidos con HF, HCl, para así eliminar posibles restos introducidos en el proceso de difusión en los hornos. Siendo las formas más usadas para el proceso de difusión del fosforo en hornos de cuarzo y hornos de cinta.

Figura 13: Horno de Cuarzo (a) y Horno de Cinta (b) para la difusión del Fosforo²⁵



3.3.1.7 Adición capa antirreflejante

Consiste en la deposición de una capa fina de material transparente con índice de refracción óptimo $n=2,3$ para adaptar los índices de refracción del silicio ($n=3,6$ promedio) y el vidrio ($n=1,5$). Se utilizan materiales como el SiO , SiO_2 , entre otros. El silicio pulido tiene coeficientes de reflexión entre el 33% y el 54% en el intervalo espectral de interés. Una capa antirreflexiva disminuye esta reflexión en promedio al 10%, dos pueden reducirla al 3%.

3.3.1.8 Inserción contactos

En primera instancia se fijan los contactos de la parte frontal de la oblea, cuyos requisitos para una óptima instalación y funcionamiento son: baja resistencia de contacto con la sílice, baja resistividad, baja relación ancho-largo de los contactos, buena adhesión mecánica, facilidad de soldadura y compatibilidad con el encapsulado que tienen las células. La Plata es el material comúnmente más utilizado debido a su relación resistividad-precio-disponibilidad, ya que el Cobre provoca problemas en el proceso de serigrafiado (Pegado) sobre la superficie de los contactos (fingers) de plata a la cara frontal de la célula.

Posteriormente se fijan los contactos posteriores, en donde el proceso es similar al de los contactos frontales, salvo que el patrón de serigrafiado es distinto y la pasta de contacto para fijarlos contiene tanto Plata como Aluminio. Esto se debe a que la Plata no es capaz de formar contactos óhmicos con el silicio tipo P, pero tampoco puede usarse sólo Aluminio por su dificultad de soldadura.

²⁵ Fuente: (Barrera, y otros, 2007)

3.3.1.9 *Testeo y clasificación*

Finalizado el proceso de fabricación de las células, se procede a retirar las defectuosas y clasificar las correctas en función de sus características de voltaje y corriente suministrados. Para realizar la prueba se obtiene la curva I-V (corriente-voltaje) de cada célula al someter éstas a una luz artificial que simula la solar en una atmósfera controlada.

Posterior a la etapa de testeo y clasificación se realiza un proceso de interconectar todas las células fabricadas y el montaje respectivo entre placas de vidrio, para así conformar el módulo fotovoltaico respectivo. Posteriormente a esto, existe una nueva etapa de testeo para verificar el correcto funcionamiento del módulo como un todo.

3.3.2 *Fabricación de módulos capa fina (CdTe)*

Tal como se explicó en el informe anterior, un módulo fotovoltaico capa fina basado en telurio de cadmio (CdTe), consiste en aquel en que las células eléctricamente interconectadas están fabricadas por una aleación de cadmio y telurio. La salida eléctrica del módulo depende de salida de la célula, del esquema de la interconexión, y de las pérdidas individuales debido a las áreas no generativas y a las pérdidas por interconexión.

El procedimiento de fabricación de los módulos fotovoltaicos capa fina de CdTe, se encuentra organizado por tres conceptos químicos: (1) Condensación/reacción del Cadmio y del Telurio, (2) Reducción galvánica del Cadmio y de los iones de Telurio en una superficie y (3) Reacción del precursor en una superficie. Cada una de estas etapas se describe a continuación en los siguientes apartados (adaptado de (Barrera, y otros, 2007)):

3.3.2.1 *Condensación/reacción del Cadmio y del Telurio*

Esta etapa de la fabricación de las células capa fina, se puede dividir en los siguientes sub-procesos físico-químicos:

- **Deposición física del vapor (PVD)**

La evaporación se puede realizar en crisoles abiertos o células tipo Knudsen de la efusión, con el control de abastecimiento superior sobre la distribución y la utilización de la viga. Para la formación de la célula, el índice de la deposición y la uniformidad con que llega el substrato son controlados por temperatura de la fuente, geometría de la célula, fuente a la distancia del substrato, y la presión del total. Dentro de la célula de deposición, el transporte de la masa a la salida del inyector ocurre en un régimen transitorio del flujo, entre el flujo molecular libre y el flujo de difusión limitado. Las células de deposición se construyen típicamente del nitruro o del grafito del boro.

- **Sublimación en espacio cerrado (CSS)**

Para evaporar las películas de CdTe sobre los sustratos a las temperaturas superiores a 400°C, la re-evaporación del Cd y Te. Limita la velocidad de deposición y utilización de CdTe. Esto puede ser atenuado depositando a una presión más alta, 1 [Torr], pero la transferencia total de la fuente al sustrato llega a ser limitada, así que la fuente y el sustrato se deben transferir en contornos próximos. Para la CSS, el material fuente de CdTe se apoya en un sostenedor que tiene la misma área que el sustrato; la cubierta del sostenedor y del sustrato de la fuente sirve como susceptores para la calefacción radiactiva y conduce calor a la fuente de CdTe y al sustrato, respectivamente. Un espaciador aislador permite el aislamiento termal de la fuente del sustrato, para poder mantener un diferencial de temperatura durante la duración de la deposición.

- **Deposición del vapor por transporte (VTD)**

El proceso VTD permite la deposición en alta temperatura del sustrato en presiones que acercan a 0,1 atmósferas sobre los sustratos móviles. Mientras que el CSS es de limitado difusión, VTD trabaja por transferencia convectiva de una corriente del vapor saturada con Cadmio y Telurio al sustrato, donde la sobresaturación del Cd y del Te vaporiza resultados en la condensación y la reacción para formar CdTe. La fuente de CdTe consiste en un compartimiento calentado que contiene CdTe sólido en sobre el cual el gas portador se mezcla con los vapores del Cadmio y de Telurio y se aloje a través de una hendedura, encima del sustrato móvil en una distancia en la orden de 1 centímetro.

3.3.2.2 *Reducción galvánica del Cadmio y de los iones de Telurio en una superficie*

En esta etapa ocurre un proceso que se denomina electrodeposición, que principalmente consiste en la reducción galvánica del Cadmio y del Telurio en cuanto a los compuestos Cd^{2+} y $HTeO_2^+$ en iones en electrólito acuoso ácido.

La gran diferencia en potencial de la reducción hace necesario la limitación de la concentración de la especie más positiva, Telurio, para mantener la estequiometría en el depósito. En la práctica, la concentración baja de la especie de Telurio y limita la tasa de crecimiento de CdTe debido al agotamiento de Telurio en la solución. Para superar esto, el electrólito se agita potentemente, y se emplean diversos métodos de relleno de Telurio.

3.3.2.3 *Reacción del precursor en una superficie*

Esta etapa de la fabricación de las células capa fina, se puede dividir en los siguientes sub-procesos físico-químicos:

- **Deposición de vapor químico orgánico en el metal (MOCVD)**

El MOCVD es una técnica para depositar las películas de CdTe a temperatura moderada baja de precursores orgánicos del Cadmio y de Telurio tales como dimetilcadmio y el diisopropiltelurio, en gas portador del hidrógeno. Los substratos se apoyan en susceptores del grafito y se pueden calentar radiactivamente o juntándose a un generador. La deposición ocurre por la descomposición pirolítica de los gases de la fuente y de la reacción de la especie del Cadmio y de Telurio. Por consiguiente, la tarifa de crecimiento depende fuertemente de la temperatura del substrato, que se extiende típicamente a partir de 200 a 400°C.

- **Deposición del aerosol**

La deposición del aerosol es una técnica para depositar CdTe de una mezcla que contiene CdTe, CdCl₂, y un portador tales como glicol del propileno. La mezcla se puede rociar sobre los substratos sin calentar o calentados, después de lo cual se realiza un tratamiento de la reacción de la recristalización.

- **Deposición “Screen-Print”**

La deposición Screen-print es quizás la más simple de las técnicas empleadas en el proceso de producción de células CdTe, combinando el Cadmio, Telurio, CdCl₂, y una carpeta conveniente en una goma que se aplica al substrato a través de una pantalla. Después de un paso de sequía para quitar solventes de la carpeta, la capa se cuece al horno en temperaturas para encima de 700°C para recristalizar la película y para activar la ensambladura. Las películas fabricadas con este método tienen típicamente un grueso del 10 a 20 µm con la dimensión lateral del grano de 5 µm y orientación al azar.

3.4 Certificaciones existentes de reciclabilidad de módulos FV

Tal como se ha señalado a lo largo del estudio, el reciclaje de módulos fotovoltaicos se ha convertido en un tema emergente de gran importancia y varias conversaciones y actividades han sido realizadas y desarrolladas por gobiernos, organizaciones y empresas. En este sentido, por ejemplo, Unión Europea ha liderado estos análisis mediante la Directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de la UE (RAEE) revisada en 2012 (2012/19/UE) (Union Europea, 2012) aborda la gestión de residuos de todos los componentes electrónicos, incluidos los módulos fotovoltaicos, en los estados miembros de la UE.

Tal directiva, indica que el 75% / 65% (tasa de recuperación / reciclaje) de los módulos fotovoltaicos en masa debiesen ser reciclados hasta 2016, para luego aumentar a 80% / 75% en 2018 y luego a 85% / 80% en años posteriores. Además de este esquema regulatorio, es obvio que las tecnologías de reciclaje deben estar disponibles para cumplir con los crecientes requisitos de la Directiva mencionada, a un costo razonable.

Tabla 3: Tratamiento de Módulos Fotovoltaicos bajo la Directiva de la Unión Europea 2012/19/UE:

2016		2018		Posteriores	
Tasa de Recuperación	Reciclaje	Tasa de Recuperación	Reciclaje	Tasa de Recuperación	Reciclaje
75%	65%	80%	75%	85%	80%

3.4.1 Condiciones internacionales para la existencia de certificaciones

En esta línea, a continuación, se da cuenta de diversas experiencias internacionales que poseen directivas que sientan las bases para contar con certificaciones para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.

3.4.1.1 Europa

El reciclaje de los módulos fotovoltaicos en la Unión Europea es obligatorio desde el año 2012 a través de la Directiva Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (Directiva 2012/96/EC) (Unión Europea, 2012), la que incluye objetivos de recolección, recuperación y reciclaje de residuos de equipos eléctricos y electrónicos, incluidos paneles fotovoltaicos. Desde 2012, todos los estados miembros de la UE han incluido los requerimientos emanados de la Directiva en el tratamiento de los paneles fotovoltaicos a la legislación nacional, exigiendo a todos los productores que comercialicen paneles fotovoltaicos dentro de la Unión Europea para operar sus propios sistemas de recuperación y reciclaje o unirse a los que son conocidos como esquemas de cumplimiento del productor.

En correspondencia con la Directiva WEEE, una serie de iniciativas europeas de I+D están impulsando la mejora de las técnicas de reciclaje para las diferentes familias de tecnología fotovoltaica. Estas iniciativas apuntan a disminuir los costos de reciclaje y aumentar las posibles fuentes de ingresos de las materias primas secundarias recuperadas a través del proceso de reciclaje.

La Comisión Europea también solicitó al Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) desarrollar estándares específicos de tratamiento fotovoltaico para diferentes fracciones del flujo de residuos de los paneles para apoyar un enfoque de reciclaje de alto valor. De esta solicitud surgió el estándar EN50625-2-4 (Asociación de Normalización Española, 2017), aplicable en toda la Unión Europea, que especifica los siguientes requerimientos administrativos, organizaciones y técnicos para los residuos provenientes de los paneles fotovoltaicos:

1. Requerimientos administrativos y organizacionales
 - La infraestructura será la adecuada para las operaciones de reciclaje de los paneles fotovoltaicos.

- Será implementado un proceso dedicado al manejo de riesgos.

2. Requerimientos técnicos

- Durante el manejo y almacenamiento de los paneles fotovoltaicos desechados, la atención estará centrada, pero no limitada, a la prevención de accidentes en la manipulación debido al rompimiento de la cubierta de vidrio y a los riesgos de electrocución.
- Será establecido un sistema para identificar aquellos paneles no basados en silicio.
- Si se aplica un tratamiento mixto de paneles fotovoltaicos no basados en silicio y paneles fotovoltaicos basados en silicio, se requerirá una prueba de cumplimiento de los requisitos de descontaminación.
- El tratamiento de todos los paneles fotovoltaicos utilizará tecnologías que permitan la eliminación del plomo metálico o soldadura de plomo para lograr los requisitos de descontaminación especificados.
- El tratamiento de paneles fotovoltaicos no basados en silicio utilizará tecnologías que permitan la eliminación de sustancias peligrosas en la capa semiconductor, incluidos los contactos, para lograr los requisitos de descontaminación especificados.
- Si no está claro si un panel fotovoltaico está basado en silicio o no, los procedimientos de tratamiento deberán seguir aquellos dispuestos para paneles fotovoltaicos no basados en silicio.
- Las fracciones que contienen sustancias peligrosas no deben diluirse ni mezclarse con otras fracciones o materiales con el fin de reducir sus concentraciones.
- El contenido de sustancias peligrosas en las fracciones de vidrio no debe exceder los siguientes valores límite definidos:
 - i. 1 [mg/kg] (materia seca) de cadmio (FV basado en Si) / 10 [mg/kg] (materia seca) de cadmio (FV no basado en Si)
 - ii. 1 [mg/kg] (materia seca) de selenio (FV basado en Si) / 10 [mg/kg] (materia seca) de selenio (FV no basado en Si)
 - iii. 100 [mg/kg] (materia seca) de plomo

Además, el estándar proporciona detalles sobre los requisitos de monitoreo, muestreo e informes, así como requisitos de almacenamiento generalmente aplicables al almacenamiento de residuos eléctricos y electrónicos.

3.4.1.2 Estados Unidos

Actualmente, no existen regulaciones federales en los Estados Unidos con respecto a la recolección y reciclaje de módulos FV al final de su vida útil; por lo tanto, se aplican las regulaciones generales de residuos del país. Según el Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad del método 1311 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US Environment Protection Agency method 1311 (TCLP)), diferentes estados pueden usar procedimientos de lixiviación adicionales,

como en California, para comprobar la concentración del límite del umbral total y la concentración del límite umbral soluble para la clasificación de residuos (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016). Esto también incluye al transporte de los residuos.

En la Sesión Legislativa de California de 2014-2015, se propuso el proyecto de Ley N°489 del Senado (California Legislative Information, 2015), que autoriza al Departamento de Control de sustancias tóxicas de California para cambiar la clasificación de los módulos FV al final de su vida útil identificados como peligrosos a residuos universales. El proyecto ahora es ley en California, en donde se hizo un aviso público sobre la reglamentación en el otoño de 2017, y la regla entraba en vigor dentro del año siguiente. Actualmente, esta ley se encuentra en modificación²⁶.

En julio de 2017, el estado de Washington aprobó el proyecto de Ley N°5.939 del Senado, que modifica el sistema de incentivos fiscales para sistemas de energías renovables estatales y que requiere de un programa de recuperación y reciclaje para módulos FV al final de su vida útil. La ley requiere que los fabricantes preparen planes de administración de productos que describan cómo financiarán el programa de recuperación y reciclaje y prevé la recuperación de módulos fotovoltaicos en ubicaciones dentro del estado. El requisito de administración establece que los fabricantes que venden los paneles solares en el estado de Washington después del 1 de julio de 2017 son responsables de financiar y proporcionar un programa de reciclaje para sus unidades. Los fabricantes que no ofrezcan un programa de reciclaje no podrán vender paneles solares con posterioridad al 1 de enero de 2021.

En julio de 2019, se promulgó un proyecto de Ley en Carolina del Norte (HB 329) que instruye a la Comisión de Manejo Ambiental para desarrollar regulaciones de supervisión en la gestión de los residuos de paneles solares al final de su vida útil y proyectos solares de gran escala.

En agosto de 2019, en Nueva Jersey se promulgó el proyecto de Ley SB 601 que establece la Comisión de Reciclaje de Paneles Solares de Nueva Jersey, la cual desarrollará recomendaciones y reportes de las opciones de gestión en el reciclaje de paneles solares al final de su vida útil en el estado.

También existen iniciativas en Nueva York, como la SB 942, que incluirían que los fabricantes y vendedores de paneles solares en el estado deberán implementar un programa de recolección y reciclaje sin costo para el dueño del sistema. También se establecería una prohibición de que los paneles solares en desuso sean depositados en vertederos (EPA, 2019). Esta iniciativa aún se encuentra en el Comité de Conservación Ambiental del Senado²⁷.

La recolección y el reciclaje voluntarios de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil han sido promovidos por varios integrantes de la industria fotovoltaica. Por ejemplo, la compañía First Solar opera instalaciones de reciclaje a escala comercial en Ohio para sus propios productos fotovoltaicos de capa fina de telurio de cadmio (CdTe), así como en Alemania y Malasia.

La Asociación de Industrias de Energía Solar de E.E.U.U. (SEIA: Solar Energy Industries Association) ha formado un comité de responsabilidad social corporativa que revisa los desarrollos relacionados con el reciclaje de paneles fotovoltaicos. Ya está en operación un Programa Nacional de Reciclaje

²⁶ Fuente: (https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billStatusClient.xhtml?bill_id=201520160SB489)

²⁷ <https://www.nysenate.gov/legislation/bills/2019/s942>

de Paneles Fotovoltaicos para los miembros de la SEIA, cuyos lineamientos principales son los siguientes:

- Identificar y recomendar recicladores que puedan gestionar los residuos fotovoltaicos, tratando de evitar su disposición en vertederos.
- Proporcionar a los miembros del SEIA una administración de cuentas específica y precios exclusivos para sus miembros.
- Establecer procesos nuevos e innovadores.
- Hacer seguimiento a los residuos y asegurar de que existan soluciones y canales disponibles cuando se registre un aumento en el volumen de residuos.

Además, SEIA está planeando estrategias proactivas de gestión de residuos en un esfuerzo por hacer que toda la industria no utilice los vertederos. Esto incluye el programa de la red nacional de reciclaje, que proporciona un portal (Solar Energy Industries Association, 2020) para que los propietarios y consumidores de sistemas fotovoltaicos sepan cómo reciclar sus sistemas de manera responsable, e invertir en investigación y desarrollo que conduzca a mejores tecnologías de reciclaje. Con el objetivo de crear economía circular global a largo plazo, SEIA está pensando en cómo reutilizar sus componentes en nuevos productos para un mejor futuro y planea invertir los ahorros en los costos de gestión eficaz de residuos en investigación y desarrollo para la "nueva vida" de los paneles fotovoltaicos después de décadas de servicio produciendo energía limpia y renovable (Solar Energy Industries Association, 2020).

3.4.1.3 *Japón*

Japón no tiene regulaciones específicas para el manejo de los paneles FV al final de su vida útil, y, por lo tanto, deben ser tratados bajo el marco normativo general para la gestión de residuos (Ley de gestión de residuos y limpieza pública).

La ley define los residuos, las responsabilidades del generador y manipulador de residuos y los aspectos de gestión de residuos industriales, incluida la eliminación en vertederos.

El Ministerio de Economía, Intercambio e Industria (METI) y el Ministerio de Medio Ambiente (MOE) han evaluado conjuntamente cómo manejar los equipos de energía renovable al final de su vida útil tales como paneles solares, paneles termosolares y turbinas eólicas. En junio de 2015, se desarrolló un roadmap para promocionar un esquema para la recolección, reciclaje y correcto tratamiento de esos residuos (Mizuho Information & Research Institute, Japan, 2016), incentivando la promoción de tecnología, diseños ambientalmente amigables, guías para el desmantelamiento de equipos, transporte y tratamiento, además de publicidad para los usuarios. La primera edición de este roadmap fue publicada en abril del año 2016. El lineamiento cubre información básica tales como leyes y regulaciones importantes, transporte, reutilización, reciclaje y disposición de residuos industriales.

El lineamiento resume las leyes existentes y los puntos concernientes para cada etapa del manejo de los paneles fotovoltaicos desechados para informar a los propietarios de sistemas fotovoltaicos e industrias relevantes.

Las etapas cubiertas por esta guía son las siguientes:

- Desmantelamiento
- Recolección y transporte
- Reutilización
- Reciclaje y disposición final

El público objetivo al cual está dirigido este lineamiento considera a los operadores y dueños de sistemas fotovoltaicos, fabricantes, instaladores, dueños residenciales, empresas constructoras y de demoliciones, compañías de seguros, operadores de sistemas de disposición y reciclaje, operadores de sistemas de recolección y transporte y gobiernos locales (Mizuho Information & Research Institute, Japan, 2016).

En 2013, el MOE, bajo la Nota 13/JIS K0102:2013 método (JLT-13), entrega una caracterización de residuos fotovoltaicos a través de prueba de lixiviación. Esto implica que, en diferentes jurisdicciones, los módulos de capa fina de CdTe y C-Si pueden considerarse residuos peligrosos o no, en función de los resultados de estas pruebas.

El Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones de Japón (MIC), durante septiembre de 2017, planteó las siguientes recomendaciones a abordar por el METI y MOE:

- Hacer frente a los módulos dañados debido a un desastre (prevención de descargas eléctricas, etc.): para estar completamente informado sobre el riesgo de descargas eléctricas, etc. y asegurar la implementación de medidas preventivas. Se debe que destacar que, en Japón, la causa más frecuente para fallas de módulos FV antes de cumplir un ciclo de vida son desastres naturales.
- Eliminación o reciclaje adecuado de módulos usados: medidas para confirmar y obtener fácilmente información sobre sustancias nocivas, aclaración de la obligación de proporcionar información, clarificación del método apropiado de relleno sanitario, examen que incluye mejoras legales en el desarrollo de recolección de módulos/sistema adecuado de eliminación / reciclaje (Komoto, 2018).

La Asociación Japonesa de Energía Fotovoltaica (JPEA), durante el año 2017, publica la primera edición de la "Guía sobre el suministro de información para el tratamiento adecuado de los residuos de módulos fotovoltaicos". La guía muestra cómo la industria fotovoltaica (miembros de JPEA) proporcionará información sobre materiales contenidos en módulos PV como Pb, Cd, As y Se, además de una introducción a las instalaciones disponibles en Japón para el tratamiento adecuado y reciclaje de los módulos fotovoltaicos. En su sitio web se ofrece información acerca de las preguntas frecuentes sobre el tratamiento y reciclaje adecuado para los módulos fotovoltaicos (primera edición en 2016 y actualizada en 2017 y 2018) (Komoto, 2018).

Durante el año 2018, se dio una discusión sobre la promoción de la adecuada gestión de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil (METI, 2018):

- Revisión de una directriz para proyectos fotovoltaicos/plan de negocios: Hacer obligatorio acumular fondos para el tratamiento de residuos.
- Informar sobre la acumulación/recolección de módulos y su progreso bajo el esquema FIT (sin obligaciones ni multas) (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016).

- Necesidad de compartir información sobre materiales peligrosos contenidos en módulos fotovoltaicos entre fabricantes y procesadores de residuos industriales.

En julio de 2018, el MOE promueve la gestión adecuada de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil considerando consideraciones ambientales sobre módulos fotovoltaicos:

- Promover la reutilización:
 - Norma sobre reutilización.
 - Reducción de costos de logística e inspección.
- Promover el reciclaje y el tratamiento adecuado
 - Pronosticar la cantidad de desechos y desarrollar un esquema para el reciclaje y el tratamiento adecuados.
 - Proporcionar información sobre materiales peligrosos contenidos en módulos fotovoltaicos.
 - Introducir esquema institucional.
- Tema para consideración ambiental
 - Discusión sobre esquemas institucionales como la evaluación ambiental.

3.4.1.4 China

Actualmente, China no posee ninguna regulación específica para el tratamiento de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. Sin embargo, se han dado a conocer sugerencias que incluyen la necesidad de leyes especiales y regulaciones para el reciclaje de los paneles fotovoltaicos, objetivos para las tasas de reciclaje y la creación de los marcos financieros necesarios. Desde el punto de vista tecnológico, las recomendaciones se concentran en el desarrollo y prueba de tecnologías de reciclaje y procesamiento para los paneles de silicio cristalino y de capa fina, de bajo consumo de energía, bajo costo y alta eficiencia (McKinsey Global Institute, 2017).

Se espera que durante el Plan Quinquenal para el 2016 – 2020, se incluyan las siguientes directrices para el manejo de los paneles fotovoltaicos (Sharma, Pandey, & Kolhe, 2019):

1. Tecnología de reciclaje de paneles de capa fina
 - CdTe
 - CIGS
2. Demostración empírica y desarrollo de equipamiento clave para el reciclaje eficiente de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino a gran escala, bajo consumo de energía y bajo costo
 - Línea de demostración de 100 MW
 - Equipamiento clave y diferentes tecnologías para el reciclaje
 - Reutilización del material reciclado

3. Desarrollo de plataformas móviles para el reciclaje in-situ de paneles fotovoltaicos cristalino en escalas de MW
 - Foco en las grandes plantas chinas
 - Plataforma de pre-tratamiento para reciclaje in-situ con el fin de reducir los costos del transporte
4. Especificaciones y políticas estándar de reciclaje

3.4.1.5 República de Corea

No existen normas específicas que rijan la gestión de los residuos al final de la vida útil de los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, el informe de "Proyectos de información energética y apoyo a políticas de 2015" (Sharma, Pandey, & Kolhe, 2019) del Ministerio de Comercio, Industria y Energía (MOTIE) propuso la adición de un reglamento que exige la adición de un mandato regulatorio que incluya la disposición de los residuos fotovoltaicos en la actual "Acta sobre la Promoción del Desarrollo, Uso y Difusión de Energía Nueva y Renovable" como una medida para incrementar el reciclaje de los paneles fotovoltaicos. De acuerdo con el informe, es más eficiente agregar regulaciones a la ley existente sobre energía renovable que cubran los residuos fotovoltaicos, en lugar de crear una nueva ley específicamente sobre residuos fotovoltaicos. El informe también recomienda que se seleccione una organización pública para manejar el registro y los procedimientos relacionados con la notificación de la eliminación de residuos de los paneles fotovoltaicos, ya que actualmente no existe ninguna organización encargada (Sharma, Pandey, & Kolhe, 2019).

En 2016, se lanzaron dos nuevos proyectos para el reciclaje de módulos fotovoltaicos. Uno es un proyecto de I + D para tecnologías de reciclaje mediante el desarrollo de una instalación de reciclaje con una capacidad de 2 toneladas por día, cuyo objetivo era recuperar obleas sin daños de los paneles fotovoltaicos desechados cuyo rendimiento fuera superior al 70%, para reducir el consumo de electricidad en la fabricación de nuevos módulos fotovoltaicos. El otro proyecto considera el establecimiento de un centro de reciclaje FV en Corea para la gestión de paneles fotovoltaicos desechados. Los logros esperados de este proyecto consideran los siguientes puntos:

- Construir un centro para el reciclaje de paneles fotovoltaicos cristalinos y de capa fina.
- Establecer la tecnología, procesos e instalaciones para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, con una capacidad de 3600 toneladas/año.
- Establecer un sistema para la declaración, recolección y transporte de residuos fotovoltaicos.
- Apoyar el anuncio gubernamental acerca del manejo de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.
- Preparar un plan para probar la operación y el crecimiento de un centro de reciclaje de paneles fotovoltaicos.

3.4.2 Certificaciones existentes

A la luz de los antecedentes expuestos anteriormente, y considerando, en general, una falta de normativas específicas para el tratamiento de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil se hace evidente que tampoco existe un conjunto de certificaciones que indiquen que un dueño, fabricante u operador de sistemas fotovoltaicos está comprometido con el tratamiento responsable de los residuos provenientes de los paneles, una vez que estos han cumplido su ciclo de trabajo.

La excepción es PV Cycle²⁸. Esta organización fue fundada el 5 de julio de 2007 por la industria fotovoltaica europea y conforma una asociación sin fines de lucro, cuya función es ofrecer soluciones especializadas de gestión de residuos únicamente provenientes de paneles fotovoltaicos y servicios para el cumplimiento normativo a empresas con residuos en cualquier país del mundo. Además, al ser una asociación sin fines de lucro, es independiente de inversores y plantas de reciclaje. Su sede central se encuentra ubicada en Bruselas, Bélgica.

PV Cycle es financiado enteramente por los fabricantes e importadores de paneles fotovoltaicos en Europa, ofreciendo más de un centenar de puntos de recogida certificados en todos los estados miembros de la UE y en los países de la Asociación Europea para el Libre Comercio (AELC), incluidos Islandia, Noruega, Suiza y Liechtenstein.

El servicio de recolección es gratuito y está abierto a todos aquellos clientes que necesiten eliminar paneles fotovoltaicos de las marcas de sus miembros. Son aceptados todos aquellos paneles de las marcas asociadas, así como los paneles que han sufrido daños durante el transporte o la instalación y los sujetos a cualquier tipo de reclamación de garantía y trata todas las tecnologías fotovoltaicas disponibles actualmente en el mercado. Entre los usuarios potenciales se encuentran:

- Contratistas de instalaciones eléctricas
- Comercios minoristas
- Distribuidores
- Mayoristas
- Fabricantes
- Empresas de demolición
- Viviendas particulares
- Usuarios finales industriales

El servicio de recolección de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil consta de dos servicios diferentes, según las cantidades que se eliminen:

- **Servicio de recolección para pequeñas cantidades (<30 – 40 módulos):** PV Cycle ofrece contenedores en los puntos de recolección situados en comercios de paneles fotovoltaicos minoristas y mayoristas o en contratistas de instalaciones eléctricas.
- **Servicio de recolección para grandes cantidades:** PV Cycle ofrece a las obras grandes de construcción, renovación y demolición un servicio de recolección adaptado a cada caso.

²⁸ www.pvcycle.org

Una vez recolectados, los paneles se transportan a plantas de reciclaje. Los materiales reciclados se utilizan posteriormente en productos nuevos.

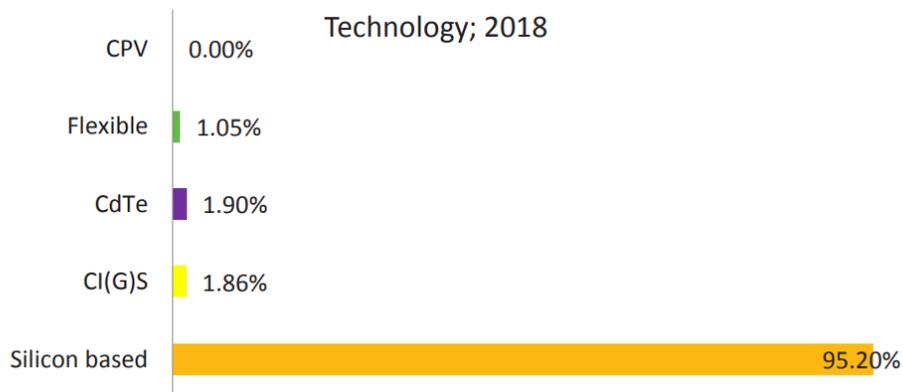
Todas aquellas empresas que desempeñen un papel activo en la cadena de valor de la energía fotovoltaica (instaladores, distribuidores, desarrolladores de proyectos, almacenes que trabajen con paneles FV, etc.) pueden solicitar ser un punto de recolección. Otros tipos de empresas u organismos públicos deben dirigirse directamente a PV Cycle.

Entre las ventajas de ser un punto de recolección certificado se cuentan:

- Un servicio extra que lo distinguirá entre sus clientes.
- Un certificado de PV Cycle que reconoce el punto de recolección como socio del programa.
- Inclusión en la lista de socios de la web de PV Cycle, junto con los datos de contacto.
- Materiales de marketing en copia impresa y en versión electrónica.
- Uso gratuito del logotipo de PV Cycle.

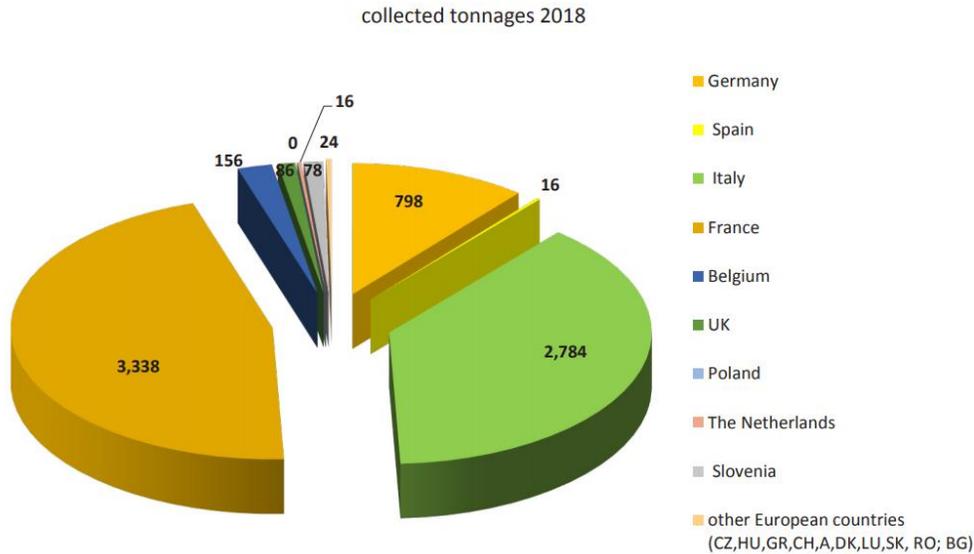
Con un total de 27.195 toneladas procesadas desde el inicio de sus operaciones en 2010, y 7.296 toneladas solo en 2018, PV Cycle mantiene una posición de liderazgo mundial en la recolección y tratamiento de residuos de paneles fotovoltaicos. Si bien registraron un aumento regular en los diferentes mercados, Francia batió récords para 2018, con 3.338 toneladas de paneles tratados y representando un aumento de más del 46% de sus operaciones, seguidas directamente por Italia con 2.784 toneladas. A nivel mundial, PV CYCLE ha recolectado y procesado un 75% más que en 2017 (PV Cycle, 2018). Asimismo, el 95,2% de los paneles fotovoltaicos tratados por PV Cycle en 2018 están basados en silicio, tal como se aprecia en las siguientes figuras.

Figura 14: Proporción de tecnologías de módulos FV tratadas por PV Cycle en 2018.²⁹



²⁹ Fuente: (PV Cycle, 2018)

Figura 15: Volumen (en toneladas) de módulos FV tratados por país y PV Cycle en 2018.



Los servicios que PV Cycle ofrece a sus clientes son los siguientes:

- Cumplimiento normativo de residuos, según la legislación de cada país
- Recolección y gestión de residuos
- Consultoría en gestión de residuos
- Eliminación de residuos
- Programas de gestión de residuos
- Servicios nacionales

PV Cycle facilita que las compañías miembros puedan cumplir con sus obligaciones legales, de una manera fácil y efectiva.

En la Unión Europea y de acuerdo con las obligaciones ineludibles que plantea la Directiva 2012/19/UE, detallada anteriormente, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, se define que tanto el fabricante, como el vendedor y el importador de paneles fotovoltaicos son responsables de los residuos producidos al final de su vida útil. En este contexto, PV Cycle, a través de sus servicios legales, cubre los siguientes requerimientos:

- **Registro y Declaración**

Las compañías deben registrarse y declarar los productos que ponen en el mercado. Los períodos de declaración varían de acuerdo con el estado miembro de la UE.

PV Cycle ofrece una plataforma de registro y declaración centralizados para una serie de productos de desecho en uno o más países de la UE.

También registra a las compañías en los Registros de la WEEE (Waste of electrical and electronic equipment) de la UE.

- **Recuperación y Tratamiento**

Las compañías necesitan garantizar una infraestructura integral de tratamiento y recuperación de residuos para sus productos.

PV Cycle proporciona una red de expertos que trabajan a través de Europa y ofrece puntos de recolección municipales o propios y servicios de recolección a medida del cliente.

Además, PV Cycle garantiza que todos los productos recolectados son tratados, utilizando exclusivamente las mejores técnicas disponibles.

- **Financiamiento**

Las compañías deben proporcionar una solución financiera que cubra los aspectos administrativos y operacionales de la recolección y el tratamiento de los productos de desecho.

PV Cycle otorga soluciones financieras que cubren cualquier obligación financiera nacional.

Al ser un esquema colectivo, la compañía es libre de separar sus finanzas, dependiendo del país.

Por último, PV Cycle al ser una organización sin fines de lucro, aplica políticas de precios transparentes y justas.

- **Información y Rotulado**

Las compañías deben informar a sus clientes sobre la correcta disposición de los residuos y proporcionar las instalaciones de tratamiento con la composición y uso de los productos y materiales peligrosos. Cada producto debe llevar información de la compañía, tales como nombre, logo, número de identificación, u otro. Los paneles fotovoltaicos deben ser marcados adicionalmente con el símbolo del contenedor de basura tachado.

PV Cycle ofrece a sus miembros servicios de campaña e información.

PV Cycle también trabaja con instalaciones de tratamiento de los productos de sus miembros.

También ofrece el servicio de representación de sus miembros antes las autoridades.

- **Representación Autorizada**

Una Representación Autorizada es una obligación imperativa de cumplimiento legal para las empresas que venden directamente a los hogares a través de tiendas de venta en línea. Estas empresas deben solicitar un Representante autorizado nacional.

PV Cycle ofrece servicios de Representación bajo la legislación de la WEEE de cada país miembro de la UE.

A nivel mundial, PV Cycle ofrece servicios colectivos y personalizados de gestión de residuos y de cumplimiento legal para empresas y poseedores de residuos en todo el mundo, con representaciones nacionales en mercados fotovoltaicos relevantes alrededor del globo.

En Estados Unidos, PV Cycle todavía está explorando el mercado fotovoltaico con socios locales. El objetivo principal de PV Cycle USA es promover una gestión del ciclo de vida sostenible en la industria fotovoltaica, educar a las empresas y comunidades sobre los beneficios de la gestión de residuos sostenible y proporcionar opciones seguras y sostenibles para productos de sistemas de energía solar desechados.

En Bélgica, la transposición de la legislación sobre los residuos eléctricos y electrónicos aún estaba pendiente a finales de 2018 en Valonia y en la Región de Bruselas-Capital. Mientras que la región de Flandes comenzó a aplicar el cumplimiento de la WEEE en Julio de ese año, Bruselas-Capital y Valonia continuaron sin implementar la legislación de residuos respectiva para paneles fotovoltaicos.

En otras regiones, PV Cycle cuenta con varios miembros. Durante el 2017 se asoció a Brasil, China, India, Japón, Corea y Turquía. Durante el 2018, se desarrollaron oportunidades de negocio en Japón, Australia, Corea, India, China, Chile y México. También cuenta con soluciones para países de África, tales como Sudáfrica, Kenia, Mozambique y Tanzania (PV Cycle, 2020).

4 Normativa asociada a la gestión de residuos

Una parte importante de las alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos en Chile luego de su vida útil se sustenta en la regulación existente en el país y en como esta considera este tipo de tecnologías. Para ello, en el presente capítulo se presenta una revisión de la regulación existente, principalmente en cuanto a la Ley 20.920 Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al reciclaje, y regulaciones similares que impacten al tratamiento de módulos fotovoltaicos en otros países.

Para ello, se revisa en un primer capítulo la normativa vigente en Chile. En un segundo capítulo se revisa la normativa en los 4 países elegidos y comprobados con la contraparte para el benchmarking. En un tercer capítulo se compara las normativas levantadas de los distintos países, identificando mejoras y requisitos para su consideración en la normativa nacional.

Se analizaron distintos componentes, criterios y variables que incorporan en forma directa o indirecta la formulación y operación de los esquemas de gestión que derivan de las normativas REP y el manejo de residuos de módulos fotovoltaicos en las normativas nacionales e internacionales.

4.1 Normativa ambiental aplicable a módulos FV en Chile

La responsabilidad extendida del productor es una herramienta eficiente de administración de recursos mediante la cual los productores asumen la responsabilidad de la administración al final de la vida útil de sus productos usados. Esto puede incluir la recolección, clasificación y tratamiento de estos para su reciclaje y recuperación.

Su característica básica es que los actores de la cadena de valor asumen un grado significativo de responsabilidad por el impacto ambiental de sus productos a lo largo de su ciclo de vida. Esto incluye el impacto "ascendente" de los productos relacionados con la selección de materiales, el diseño del producto y los procesos de producción como tales, así como el impacto "descendente" relacionado con el uso y la eliminación de los productos.

Al hacerlo, los productores aceptan su responsabilidad cuando diseñan sus productos para minimizar el impacto ambiental de su ciclo de vida. De este modo, asumen la responsabilidad legal y económica por el impacto ambiental de sus productos, a partir de la fase de diseño. Por lo tanto, la REP trata de "extender la responsabilidad de los productores a la etapa post-consumo de un ciclo de vida del producto".

Este tipo de políticas apareció por primera vez a principios de la década de 1990, en unos algunos Estados miembros de la Unión Europea (UE), especialmente para residuos de envases. Desde entonces, la REP ha contribuido a lograr aumentos sostenidos en las tasas de reciclaje en la región, con los consecuentes ahorros en gasto público producto de la gestión de residuos, ayudando a desacoplar los costos de la gestión de residuos del crecimiento económico.

En la actualidad, son muchos los países en el mundo que han implementado los esquemas REP como parte de su estrategia de adopción de la economía circular en sus países. En este sentido, la legislación ha sido un motor importante, y la mayoría de los esquemas REP son obligatorios en lugar de voluntarios.

En cuanto a los tipos de productos cubiertos por los esquemas REP en el mundo, los aparatos eléctricos y electrónicos son los más representados en cuanto a cantidad de sistemas REP que los incorporan. Asimismo, cuando se incluyen teléfonos móviles, baterías recargables, termostatos y conmutadores automáticos, esta categoría pasa a representar el 35% de las políticas REP a nivel mundial. Los envases y embalajes (incluidos los envases de bebidas) y los neumáticos representan cada uno el 17%. Los siguientes grupos más grandes de productos cubiertos son los vehículos fuera de uso (ELV) (7%) y las baterías de plomo-ácido (4%). El 20% restante de las políticas cubren los productos menos comunes, incluidos el aceite usado, la pintura, los productos químicos, y las bombillas fluorescentes.

4.1.1 Descripción general Ley 20.920

En Chile la Ley REP 20.920 fue aprobada en el año 2016 y contempla a los módulos fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm) como categorías de los Aparatos Eléctricos

y Electrónicos y como subcategoría refiere la materialidad de la tecnología de usada, esto es, si tienen silicio o teluro de cadmio. En la actualidad se está a la espera de la elaboración y publicación el Decreto de Metas de Residuos de AEE.

La Ley REP 20.920 tiene por objeto disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, mediante la creación de instrumentos de gestión ambiental, entre los que destaca la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente.

La Ley REP 20.920 establece que los productores de los productos prioritarios deben cumplir con ciertas obligaciones, tales como el registro, la organización y la financiación de la gestión de los residuos generados por sus productos, cumplir con los objetivos de recuperación a través de sistemas de gestión.

El Contenido de la Ley establece, entre otros temas:

- i. Un marco general para la gestión de los residuos en el país, basado en la prevención y valorización de los desechos, esto es que todos aquellos productos residuales respecto de los cuales es posible recuperar uno o varios de los materiales que lo componen o el poder calorífico de los mismos, deberán necesariamente ser destinado a tal fin evitando su eliminación.
- ii. Regula las obligaciones de generadores, gestores, importadores y exportadores de residuos.
- iii. Define al productor de producto prioritario de un producto prioritario o productor: Persona que, independientemente de la técnica de comercialización:
 - a) Enajena un producto prioritario por primera vez en el mercado nacional.
 - b) Enajena bajo marca propia un producto prioritario adquirido de un tercero que no es el primer distribuidor.
 - c) Importa un producto prioritario para su propio uso profesional.
- iv. Se introduce y regula la figura de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que corresponde a un régimen especial de gestión de residuos, conforme al cual los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos de los productos prioritarios que comercialicen en el país.
- v. Los productores de productos prioritarios estarán obligados a:
 - a) Inscribirse en el registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes que llevará el Ministerio del Medio Ambiente;
 - b) Organizar y financiar la recolección de los residuos de los productos prioritarios en todo el territorio nacional, así como su almacenamiento, transporte y tratamiento;
 - c) Cumplir con las metas y otras obligaciones asociadas, en los plazos, proporción y condiciones establecidas en los decretos supremos que dicte el Ministerio del Medio Ambiente, y

- d) Asegurar que la gestión de los residuos de los productos prioritarios se realice por gestores autorizados y registrados.
- vi. Enumera taxativamente los 6 productos a los cuales se les aplica la responsabilidad extendida del productor (REP):
- a) Aceites lubricantes.
 - b) Aparatos eléctricos y electrónicos.
 - c) Baterías.
 - d) Envases y embalajes.
 - e) Neumáticos.
 - f) Pilas.

El Ministerio del Medio Ambiente deberá fijar las metas de recolección y de valorización de los residuos respecto de cada uno de estos productos.

4.1.2 Aplicabilidad a módulos FV

En resumen, la aplicabilidad a módulos fotovoltaicos de la Ley REP se aborda en su articulado, en base a lo expuesto en la siguiente tabla:

Tabla 6: Aplicabilidad de Ley REP a módulos fotovoltaicos.

Normativa	Contenido relevante para módulos FV
<i>Ley N°20.920 Que establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.</i>	En Chile la Ley 20.920 fue aprobada en el año 2016 y en 2da disposición transitoria contempla a los módulos fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm) como categorías de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos y como subcategoría refiere la materialidad de la tecnología de usada, esto es, si tienen silicio o telurio de cadmio. En la actualidad se está a la espera de la elaboración y publicación el Decreto de Metas de RAEE.

Según se ha mencionado a lo largo del presente estudio, este sentará las bases para la aplicación particular de este instrumento legal a los módulos fotovoltaicos grandes.

4.1.3 Otras normativas existentes y aplicables al tratamiento de módulos FV en Chile

A continuación, se presenta una tabla de análisis, en cuanto a otros instrumentos normativos que existen en Chile y que involucran el tratamiento de módulos fotovoltaicos ya sea de forma directa o indirecta.

Tabla 7: Otros cuerpos normativos relacionados con el tratamiento de módulos FV en Chile

Normativa	Contenido relevante para módulos FV
<i>Ley N° 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente</i>	<p>En el año 1994 entra en vigencia la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la que establece un marco en el cual se debe desarrollar el actuar del sector público y privado, y un desarrollo jurídico adecuado a la garantía constitucional que asegura a todas las personas el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.</p> <p>Si bien no menciona en específico los RAEE, en lo relativo a la regulación del sistema de evaluación de impacto ambiental se establece la obligación de someter a evaluación, los proyectos o actividades que digan relación con la producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización de sustancias peligrosas y también los proyectos de saneamiento ambiental, entre los cuales podemos encontrar las plantas de reciclaje de RAEE.</p>
<i>D.S. N° 40 de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental</i>	<p>Este reglamento estableció las disposiciones para aquellos proyectos susceptibles de causar impacto ambiental y que debían someterse al SEIA, entre los cuales se incluyen los de saneamiento ambiental como plantas de tratamiento de residuos sólidos domiciliarios, residuos industriales y residuos peligrosos entre otros.</p>
<i>D.S. N°685 del Ministerio del Medio Ambiente</i>	<p>En el año 1992 comienza a regir el D.S. N°685 en que Chile ratifica el Convenio de Basilea. Es</p>

un Acuerdo Multilateral sobre Medio Ambiente ratificado por 170 países. Regula el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos y su eliminación, definiendo obligaciones a las Partes para asegurar el manejo ambientalmente racional de los mismos, particularmente su disposición final, aplicando el procedimiento del “consentimiento fundamentado previo”.

Decreto N° 148 del Ministerio del Medio Ambiente

En el año 2005 entra en vigencia el D.S. N°148, que establece el Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos. En el artículo 19 del reglamento establece que los residuos listados en el

artículo 90 lista B. No se consideran peligrosos y en esta lista también se encuentran incluidos algunos RAEE: “B1110 Montajes eléctricos y electrónicos:

- Montajes electrónicos que consistan sólo en metales o aleaciones.
- Residuos o chatarra de montajes eléctricos o electrónicos (incluidos los circuitos impresos) que no contengan componentes tales como baterías incluidas en la Lista A del presente Artículo, interruptores de mercurio, vidrio procedente de tubos de rayos catódicos u otros vidrios activados ni condensadores de PCB, o no estén contaminados con sustancias de la Lista II del artículo 18 (por ejemplo, cadmio, mercurio, plomo, bifenilo policlorado) o de los que esos componentes se hayan extraído

hasta el punto de que no muestren ninguna característica de peligrosidad (véase el apartado A1180 de la Lista A del presente Artículo). - Montajes eléctricos o electrónicos (incluidos los circuitos impresos, componentes electrónicos y cables) destinados a una reutilización directa, y no al reciclado o a la eliminación final”.

En este sentido el único componente que puede presentar un grado de peligrosidad son los paneles de CdTe.

D.S. N°45 del Ministerio del Medio Ambiente

En el año 2007 comienza a regir el D.S. N°45, el cual establece la norma de emisión para la incineración y co-incineración.



4.2 Normativa ambiental aplicable a módulos FV en otros países

Un desarrollo temprano de la industria de reciclaje de módulos FV será esencial para utilizar esta opción de energía renovable de manera sustentable. Por lo tanto, se requieren regulaciones de políticas de gestión del final de la vida útil para apoyar la transición a un manejo de ciclo de vida fotovoltaico completamente sostenible.

En este sentido, se deben implementar políticas y regulaciones adecuadas que promueven procesos eficientes para el tratamiento del final de la vida útil del módulo FV. Los marcos regulatorios deben incluir el desarrollo de técnicas de gestión del ciclo de vida y tecnologías de reciclaje para la recuperación de materiales.

En este capítulo se ha recopilado las normativas vigentes en los países o economías del benchmarking respecto al retiro, transporte, almacenamiento y tratamiento de los elementos derivados de los módulos fotovoltaicos, tanto técnico como ambiental.

4.2.1 Unión Europea

Las directivas de la Unión Europea están no solo reconocidas por sus Estados miembros quien se vean obligados a la implementación al nivel nacional, pero también en el resto del mundo por las buenas prácticas que exigen sus exigencias en temas del cuidado del medio ambiente y en las responsabilidades que surgen de estas para la sociedad.

En base de los tratados con sus miembros, la UE desarrolla un corpus legislativo que emana de los principios y objetivos de los tratados y está integrado por reglamentos, directivas, decisiones, recomendaciones y dictámenes.

Según el art. 288 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (TFUE) los actos jurídicos con implementación obligatorio son reglamentos, directivas y la decisiones, mientras que los actos no obligatorios son recomendaciones y el dictámenes³⁰.

Las directivas, siendo un acto jurídico de implementación obligatorio de la UE, imponen a los Estados miembros de la UE la consecución de un determinado resultado, dándoles libertad para elegir los medios. Para alcanzar los objetivos fijados por cada directiva, los países de la UE deben adoptar medidas que permitan incorporarla al Derecho nacional (transposición). Las autoridades nacionales están obligadas a comunicar tales medidas a la Comisión Europea.

³⁰ El Ordenamiento Jurídico Comunitario, Emiliano García Coso, Universidad Pontificia Comillas

La transposición al derecho nacional debe producirse en el plazo establecido en la propia directiva (suele ser, por lo general, de dos años). En caso de que un Estado miembro no incorpore una directiva a su derecho interno, la Comisión puede incoar un procedimiento de infracción³¹.

En el caso de normativa ambiental, se han levantado varias directivas de la UE cuales son aplicables a los residuos de los módulos FV y de cuales se han incorporado de una o de otra forma en los estados miembros del benchmarking de este estudio: Alemania y España.

Las directivas se elaboran según necesidad proclamado en la UE y son abiertas a actualizaciones que pueden ser complementarios o reemplazando a otras directivas anteriores, en partes o en su totalidad. En cada directiva se describe el contexto, los actos jurídicos que se derogan, sustituyen, complementan o que quedan sin efecto de esta misma.

Tal como se analizó previamente, la Directiva 2012/19/UE estableció un plazo para que los Estados miembros de la Unión Europea la aplicaran a su marco regulatorio nacional, siendo Reino Unido, Bulgaria, Dinamarca, Luxemburgo, Holanda, Italia y Francia los primeros en hacerlo. Por su parte, en 2015 la incorporaron a su marco regulatorio nacional Alemania y España

Dado a que las directivas europeas son en gran parte la base de las regulaciones nacionales, se han revisado estos en un primer paso.

Tabla 8: Regulación de la Unión Europea en cuanto a tratamiento de módulos FV.

Normativa	Contenido relevante para módulos FV
<p><i>Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos (European Commission, 2008)</i></p>	<p>Vigencia: La directiva 2008/98/CE sobre los residuos está vigente desde el 19 de noviembre de 2008. En aras de una mayor claridad y legibilidad se derogó la anterior Directiva 2006/12/CE y se sustituyó por esta directiva actual.</p> <p>Alcance: En esta directiva se definen conceptos clave como: residuos, valorización y eliminación y se establecen los requisitos esenciales para la gestión de residuos, en particular la obligación de que las entidades o empresas que lleven a cabo operaciones de gestión de residuos tengan una autorización o estén registradas. También se establece la obligación de que los Estados miembros tengan planes de gestión de residuos y se definen otros principios fundamentales como la obligación de manipular los residuos de manera que no causen un impacto negativo en el medio ambiente y la salud.</p> <p>Especialmente se debe que destacar el fomento de la aplicación de la jerarquía de residuos y, de conformidad con el principio «quien</p>

³¹ https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/types-eu-law_es

contamina paga», el requisito de que los costes de la eliminación de los residuos recaigan sobre el poseedor de los residuos o el anterior poseedor, o el productor del producto del que proceden los residuos (responsabilidad REP).

Definiciones en la Directiva relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV:

Residuo:

La definición de residuos también incluye especialmente cuando son y cuándo determinados residuos dejan de serlo.

El primero está definido en el Artículo 3 «residuo»: “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”.

El último está definido en el Artículo 6, e importante para definir las cantidades de residuos que han dejado de serlo, cuales deben contar como reciclados y valorizados para verificar y calcular el cumplimiento de los criterios de valorización y reciclaje previstos en las normas que tienen objetivos/metapas de reciclado y valorización establecidos.

Recolección:

La definición de «recogida» (recolección) según la Directiva 2008/98/CE incluye la clasificación y almacenamiento inicial de los residuos con el objeto de transportarlos a una instalación de tratamiento de residuos.

Almacenamiento:

Es necesario distinguir entre

- El almacenamiento inicial de los residuos a la espera de su recolección (en el lugar de su generación),
- El almacenamiento de residuos a la espera de su tratamiento (en un lugar de acumulación).

Los establecimientos o empresas que generan residuos durante sus actividades no deben considerarse dedicados a la gestión de residuos, ni deben que ser sometidos a la autorización para el almacenamiento de sus residuos a la espera de la recolección de estos.

El almacenamiento de residuos previo a la valorización por un periodo de tres años o más y el previo a la eliminación por un periodo de un año o más están sujetos a la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa a la disposición final de residuos.

Sin embargo, la distinción debe que hacer cada estado miembro en su normativa nacional, en función del tipo de residuos, el tamaño y el periodo de tiempo del almacenamiento y la finalidad de la recolección.

Tratamientos:

Los artículos 10, 11 y 12 definen valorización, reutilización y reciclaje (incluyendo metas en estos tratamientos) y eliminación. Además, en el Capítulo IV se habla de los requisitos para autorizaciones y registros que se exigen a cualquier empresa para el manejo y tratamiento de residuos, y sus excepciones.

REP:

Los párrafos (26) y (27) y el Artículo 8 de la directiva establecen la Responsabilidad extendida del Productor (REP). Se menciona que una de las consecuencias esperadas es la implementación de medidas de prevención de residuo y/o el ecodiseño de los productos, que facilita el uso eficaz de los recursos durante todo su ciclo de vida, incluidos su reparación, reutilización, desmontaje y reciclado sin perjudicar a la libre circulación de bienes en el mercado interior de la UE.

Los planes de gestión, cuales deben de preparar los sistemas de gestión de los productores, se definen más en detalle en el artículo 28.

La Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea:
Normativa Europea sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)

Vigencia:

La Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (denominada Directiva RAEE o WEEEII) está vigente desde el 4 de julio de 2012. Esta directiva es la base legal en la UE para la gestión de módulos fotovoltaicos al fin de la vida útil.

Alcance:

La inclusión de los módulos fotovoltaicos en esta directiva se base en un estudio encargado por la Comisión Europea cual destacó que el esfuerzo de la industria de FV a organizar una solución para el fin de vida útil no alcanzó el nivel esperado y con esto se recomendó la inclusión en la actual directiva.

El reciclaje del módulo fotovoltaico fue obligatorio a partir de 2012 a través de esta Directiva, que incluye objetivos de recolección, recuperación y reciclaje de residuos de equipos eléctricos y electrónicos, incluidos los módulos fotovoltaicos. Desde 2012, todos los estados miembros de la UE han transpuesto los requisitos de módulos FV a la legislación nacional, exigiendo a todos los productores que ponen módulos FV en el mercado dentro de la Unión Europea que operen sus propios sistemas de recuperación y reciclaje o se unan a lo que se conoce como esquemas de cumplimiento del productor (sistemas de gestión). Según eso, los productores tienen la responsabilidad extendida de la gestión de los residuos generados por sus productos (REP).

La implementación de esta directiva al nivel nacional de los estados miembros tuvo como plazo hasta el 14 de febrero de 2014, siendo Reino Unido, Bulgaria, Dinamarca, Luxemburgo, Holanda, Italia y Francia los primeros en hacerlo. Por su parte, en 2015 la incorporaron a su marco regulatorio nacional Alemania y España

La directiva tiene por objetivo contribuir a la producción y consumo sustentable, mediante, en el orden de prioridad, la prevención de la generación de RAEE y, la reutilización, el reciclaje y otras formas de valorización de dichos residuos, a fin de reducir su eliminación y contribuir al uso eficaz de los recursos y a la recuperación de materias primas secundarias valiosas.

Para este fin se busca a establecer normas mínimas relativas al tratamiento de los RAEE y estandarizar la base de una REP a escala de la Unión Europea (párrafo 6 de la directiva).

En el párrafo 9 de la directiva se menciona explícitamente la inclusión de los módulos fotovoltaicos.

Definiciones en la Directiva relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV:

Entre otras cosas, los Estados miembros a base de esta directiva deben garantizar el cumplimiento de los siguientes puntos:

Responsabilidades de productores:

- Se garantiza el tratamiento y el reciclaje de los residuos de estos dispositivos recolectados o recuperados.
- Se cumple con la responsabilidad principal de los costos de recolección, manipulación y tratamiento
- Se garantiza que la eliminación sustentable se financiará más adelante, cada vez que lanzan un nuevo dispositivo en el mercado.
- Se debe que estar establecido en el país de comercialización del producto como productor o nombrar un representante autorizado responsable del cumplimiento de las obligaciones

Recolección y Reciclaje:

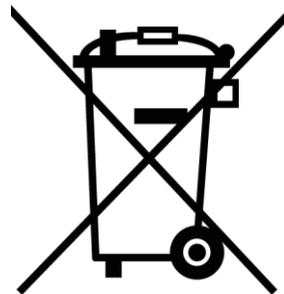
- Los RAEE deben recolectarse por separado de los residuos domésticos de acuerdo con los requisitos de la Directiva.
- La devolución de dispositivos antiguos/usados debe ser gratuita para los consumidores privados.
- Los distribuidores deberían retirar RAEE de hogares privados bajo ciertas condiciones.
- Se deben que cumplir los objetivos/metastablecidos para la recolección y el reciclaje o la recuperación.

- Los sistemas/lugares de recolección correspondientes deben establecerse en función de la densidad de población.
- Se deben que cumplir los requisitos mínimos técnicos para el almacenamiento y el tratamiento de los RAEE

Etiquetado:

- Los productores deben que cumplir con los requisitos especiales de etiquetado. Todos los equipos eléctricos y electrónicos que entran dentro del alcance de la directiva deben estar marcados con el símbolo del cubo de basura tachado.

Figura 3: Etiquetado RAEE de la U.U.E.E



Fuente: <https://www.elektrogesetz.de/hintergruende/downloads/>

Metas:

- Los Estados miembros deben alcanzar un objetivo de recolección establecido.

En la siguiente tabla se muestra el desarrollo de la directiva actual y sus metas en el momento de vigencia.

	Meta de recolección anual	Meta de recolección/reciclaje anual
Directiva RAEE original (2002/96/EC) (derogada)	4kg/habitante	75% recolección, 65% reciclaje

Directiva RAEE (2012/19/EU) hasta 2016	4kg/habitante	Inicialmente 75% recolección, 65% reciclaje, 5% crecimiento después de 3 años
Directiva RAEE (2012/19/EU) desde 2016 hasta 2018	45% (peso) de todo AEE puesto en el mercado	80% recolección, 70% preparado para reutilización y reciclaje
Directiva RAEE (2012/19/EU) desde 2018	65% (peso) de todo AEE puesto en el mercado o 85% de residuos generados ³²	80% recolección, 80% preparado para reutilización y reciclaje

Metas anuales de recolección y recuperación (% en masa) según la Directiva RAEE de la Unión Europea. En: IRENA 2016 AND IEA-PVPS 2016.

La Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de enero de 2003,

Vigencia:

Esta directiva está vigente desde de junio de 2011 y sustituyó a la Directiva 2002/95/CE la cual fue aplicable sobre los paneles fotovoltaicos.

La directiva define en su artículo dos, la no aplicabilidad a paneles fotovoltaicos:

“La presente Directiva no se aplicará a los paneles fotovoltaicos previstos para ser utilizados en un sistema diseñado, ensamblado e instalado por profesionales para su uso permanente en un emplazamiento definido, destinados a la producción de energía solar para aplicaciones públicas, comerciales, industriales y residenciales (art. 2 Directiva RoHS)”

Alcance de la directiva anterior:

La Directiva sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, exige la sustitución de las sustancias prohibidas presentes en todos los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) incluidos en su ámbito de aplicación.

Aunque la Directiva 2002/95/CE ha contribuido eficazmente a la reducción de las sustancias peligrosas contenidas en AEE nuevos, en los RAEE seguirán estando presentes durante muchos años

³² Los productores informan los productos puestos en el mercado, por lo que estas cifras tienen poca incertidumbre. Sin embargo, un objetivo del 65% no es realista para elementos como paneles fotovoltaicos, que tienen una vida muy larga. No tendrá en cuenta las cantidades crecientes de desechos/residuos históricos (no registrados en el pasado), así como las curvas de ciclo de vida variables por categoría de producto. Se proporciona una medida alternativa para dar cuenta de los desechos/residuos reales generados por sí solos.

sustancias peligrosas como el mercurio, el cadmio, el plomo, el cromo hexavalente y los policlorobifenilos (PCB), así como sustancias que agotan la capa de ozono. (European Commission, 2003)

4.2.2 Alemania

Alemania implementó la primera directiva europea (2002/96/CE, mencionado en el capítulo 4.2.1) en su normativa nacional en el año 2005 bajo el nombre “Elektro- und Elektronikgeräte-Gesetz (ElektroG)” Ley de Aparatos eléctricos y electrónicos (ElektroG).

Con la actualización y entrada al vigor de la directiva europea RAEE 2012/19/UE se actualizó igualmente la Ley alemana y se implementó en la legislación nacional mediante la modificación de la “Ley sobre la comercialización, la devolución y la eliminación ambientalmente amigable de equipos eléctricos y electrónicos” (también ElektroG), del 20 de octubre de 2015.

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

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

Tabla 9: Regulación de Alemania en cuanto a tratamiento de módulos FV

Normativa	Contenido relevante para módulos FV
<p>La Ley ElektroG³³³⁴ Elektrogesetz <i>Ley que regula la comercialización, devolución y eliminación ambientalmente racional de equipos eléctricos y electrónicos de Alemania</i></p>	<p>Vigencia: La actual Ley alemana para la comercialización, recuperación y eliminación de equipos eléctricos y electrónicos (ElektroG) entró en vigor por primera vez en 2005 y se modificó el 20 de octubre de 2015. Recién en 2020 se terminó la fase de ajustes y están vigente los últimos cambios en la Ley³⁵.</p> <p>Alcance:</p>

³³ Fuente: <https://www.gesetze-im-internet.de/elektrostoffv/ElektroStoffV.pdf> [https](https://www.gesetze-im-internet.de/elektrostoffv/ElektroStoffV.pdf)

³⁴ Fuente: (BSW, 2016)

³⁵ Fuente: (UBA, 2018)

La Ley ElektroG implementa al nivel nacional alemán, la directiva europea sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE 2012/19/EU y al mismo tiempo la directiva 2002/95/CE, ambos mencionados en el capítulo anterior.

Objetivos de la Ley ElektroG:

- Prevención de la generación de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE)
- Fortalecer la preparación para la reutilización de RAEE
- Eliminación ambientalmente racional de RAEE
- Protección de recursos mediante un uso y recuperación más eficientes.
- Gestión circular de los dispositivos eléctricos y electrónicos a base de la responsabilidad del productor (responsabilidad sobre el producto) y, por lo tanto, aumentar la eficiencia de los recursos.

La inclusión de los módulos FV en la Ley ElektroG:

En el área de la energía fotovoltaica, gran parte de la tecnología de instalación, como los inversores o los controladores de carga, fueron regulados por la ley eléctrica antigua (antes de 2005).

Desde el 1. febrero 2016 la Ley incluye explícitamente los módulos FV.

Definiciones en la Ley relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV:

Responsabilidad compartida sobre la gestión de los RAEE bajo la Ley ElektroG:

En Alemania, se introdujo la denominada responsabilidad compartida del producto para la eliminación de RAEE. Esto significa que las obligaciones esenciales recaen, por un lado, en las autoridades públicas de eliminación de residuos (öRE) y, por otro lado, en los productores de dispositivos eléctricos

y electrónicos. Los örE están obligados a establecer puntos de recolección de residuos de equipos eléctricos y recibirlos de forma gratuita. Actualmente existen en alrededor de 2.400 puntos de recolección municipales, como los depósitos de reciclaje (parecidos a los puntos limpios operados en Chile), los vehículos de residuos peligrosos o los contenedores de recolección. Los productores también pueden recuperar voluntariamente dispositivos fuera del uso, por ejemplo en forma de sus propios sistemas de recuperación.

Actor relevante establecido por la Ley:

La gestión de residuos electrónicos de Alemania está regulada a través del registro nacional de residuos de equipos eléctricos (Stiftung Elektro-Altgeräte Register o Stiftung EAR).

Stiftung EAR se fundó durante la implementación de la Directiva RAEE original (2005) por parte de los productores como su cámara de compensación (Gemeinsame Stelle) con el propósito de aplicar a ElektroG.

Encargada con derechos soberano desde la Agencia Federal de Medio Ambiente (Umweltbundesamt)³⁶, las responsabilidades de esta entidad son:

- Llevar a cabo el registro obligatorio de los productores y recibir la declaración de las cantidades de equipos puestos en el mercado (POM) de ellos anualmente, antes que venden equipos eléctricos y electrónicos.
- Recibir el comprobante anual de una garantía financiera para la gestión adecuada al fin de la vida útil por los productores (se explica el concepto más adelante).

³⁶ En la división del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear, se creó una autoridad federal superior independiente bajo el nombre de "Agencia Federal del Medio Ambiente", implementando las normativas ambientales, prestando asesoría al Ministerio e investigando en los temas relevantes.

- Coordinar el suministro de contenedores para la recolección en los puntos de recolección de residuos de equipos eléctricos de los örE, en toda Alemania
- Recopilar datos sobre las cantidades de residuos de equipos eléctricos y electrónicos recopilados y tratados desde los örE y los productores
- Informar el flujo anual de materiales a la Agencia Federal del Medio Ambiente;
- Identificar a los freeriders³⁷ y los informa a la Agencia Federal del Medio Ambiente

Sin embargo, Stiftung EAR no es responsable de las tareas operativas de la gestión de los módulos FV al fin de su vida útil.

Responsabilidades de los Productores:

Los productores (o sus representantes autorizados) deben que registrarse en la entidad correspondiente Stiftung EAR y aceptar las obligaciones financieras antes de la comercialización en el mercado nacional para obtener un número de registro. Sin un número de registro existente, no se pueden distribuir ni vender en el mercado alemán. De lo contrario, los proveedores enfrentan advertencias, multas e incluso prohibiciones de ventas.³⁸

Definición de las obligaciones según de la modalidad de negocio (B2C y B2B)³⁹:

B2C:

En Alemania los paneles fotovoltaicos se definen principalmente como producto de consumo B2C.

El esquema de la combinación entre la cámara de compensación colectiva

³⁷ Se denomina “freeriders” (“pasajeros sin billete”) a los productores que no cumplen con las obligaciones de la REP, y de esta forma dejan que a los otros participantes del mercado cofinancien estas obligaciones.

³⁸ <https://www.elektrogesetz.de/themen/photovoltaik-pv/#artikel-pv-elektrog2>

³⁹ B2C: Business to Consumer, B2B: Business-to-Business

(Gemeinsame Stelle Stiftung EAR) y el cumplimiento de la responsabilidad del productor, a través de contratos con gestores o sistemas de gestión REP, para la gestión del final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos B2C se muestra en una ilustración de flujos a final de esta tabla.

Opciones para usuarios de devolución de módulos FV (gratuito):

- Devolución a una entidad pública de eliminación de residuos
- Devolución al productor /distribuidor, su gestor contratado o su sistema de gestión

B2B:

La Ley ofrece una forma diferente de financiar las obligaciones para los productores que venden solo productos en una base B2B, debido a cantidades, tamaño y nivel de complejidad. Esto se debe a que la recolección y el reciclaje podrían organizarse de manera más efectiva si el propietario del equipo final o de la instalación lo proporciona. Depende de los contratos entre los productores y clientes de acordar las responsabilidades de fin de vida según lo prescrito por la Ley ElektroG, ya sea mediante la contratación del productor original para recolectar y reciclar sus paneles FV o de forma particular con ofertas competitivas del mercado de gestores en el momento del desmantelamiento.

Para las plantas fotovoltaicas a gran escala, esto incluye la flexibilidad para acordar un mecanismo que resulta en la generación de fondos para la recolección y el reciclaje desde los flujos de caja del proyecto hasta el final de la vida comercial.

Mecanismo de financiamiento de la gestión adecuada al finde la vida útil:

Existen dos mecanismos o instrumentos financieros definidos por el gobierno de Alemania para implementar la gestión

adecuada de los módulos fotovoltaicos al finde la vida útil, ambos financiados por los productores de los paneles fotovoltaicos en el mercado.

Nivel 1: El Nivel 1 financia de forma inmediata la operación de un sistema de recolección y los costos relacionados con la recolección y el reciclaje de productos (incluidos los productos históricos puestos en el mercado antes de ser incluidos en el alcance de la ley, entonces antes del 20 de octubre 2015).

Los costos de Nivel 1 se cubren utilizando un sistema PAYG (Pay-as-you-go) para todos los participantes actuales del mercado que comercializan productos de módulos fotovoltaicos a través de transacciones B2C. La distribución de estos costos organiza la la camera de compensación colectiva (Gemeinsame Stelle Stiftung EAR).

Nivel 2: El Nivel 2 asegura que haya suficiente financiamiento disponible para la recolección y el reciclaje futuros de los productos que se comercializan hoy, es decir, después de su inclusión en el alcance de la ley. Los costos que forman la base del financiamiento de Nivel 2 son uniformes para la categoría de equipos fotovoltaicos. El regulador (Stiftung EAR) los calcula teniendo en cuenta la vida útil promedio, la cuota de devolución en los puntos de recolección municipales y el tratamiento y los costos logísticos. (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016)

Responsabilidad de costo =

cuota básica para el registro (por tonelaje del panel fotovoltaico puesto en el mercado)
x tasa de retorno presunta (%)
x costes de eliminación supuestos (EUR / t)

Obligación financiera de los productores:

Los productores deben de declarar antes de la Stiftung EAR que han llegado a un acuerdo

para cubrir los costos de Nivel 2 para los productos B2C o B2B puestos en el mercado.

Acuerdos pueden ser:

- Una garantía bancaria o depósito de efectivo que se debe que comprobar cada año
- La participación en un sistema de gestión cual garantiza esta obligación financiera frente de la Stiftung EAR

Al mismo tiempo, tienen que aceptar la responsabilidad de los costos de Nivel 1 en función de su cuota de mercado actual (es decir, aceptar la responsabilidad de otros participantes del mercado).

Definiciones relevantes en la Ley sobre módulos FV:

Categoría de Dispositivo:

Los dispositivos eléctricos y electrónicos se clasifican bajo la ley eléctrica en seis categorías de productos, y después en tipos de dispositivos/aparatos. Los módulos FV están representados en la Categoría 4: Dispositivos grandes: Dispositivos en los que al menos una de las dimensiones exteriores es más de 50 centímetros

Tipo de dispositivo: Panel fotovoltaico

Grupos de Recolección (aplica a los centros de recolección públicos):

Los módulos fotovoltaicos tienen una recolección separada de los otros RAEE, definido bajo el número 6: módulos fotovoltaicos.

Esto significa que en los centros de recolección disponen contenedores separados para los módulos fotovoltaicos.

Metas:

Los dispositivos descartados (de categoría 4) deben ser tratados de tal manera que

a) el porcentaje de recuperación es al menos del 85 por ciento y

b) el porcentaje de preparación para reutilización y reciclaje es al menos 80 por ciento.

*KrWG: Kreislaufwirtschafts-gesetz
2012*

Vigencia:

La Ley vigente sobre la economía circular fue actualizado en el 1 de junio 2012 bajo el nombre: “Ley para promover la economía circular y garantizar la gestión ambientalmente racional de los residuos”. El KrWG implementa las obligaciones de la Directiva Marco de Residuos de la UE (Directiva 2008/98 / CE) en la legislación nacional alemán.

Alcance:

La Ley Alemana de la Economía Circular (KrWG) tiene como meta promover la economía circular, cuya prioridad es evitar la generación de residuos y garantizar la gestión ambientalmente racional de los residuos. Con las actualizaciones se espera que la economía circular se orienta aún más hacia la protección de los recursos, el clima y el medio ambiente.

La Ley se acoge las definiciones de la UE y se destaca el siguiente punto interesante para este estudio:

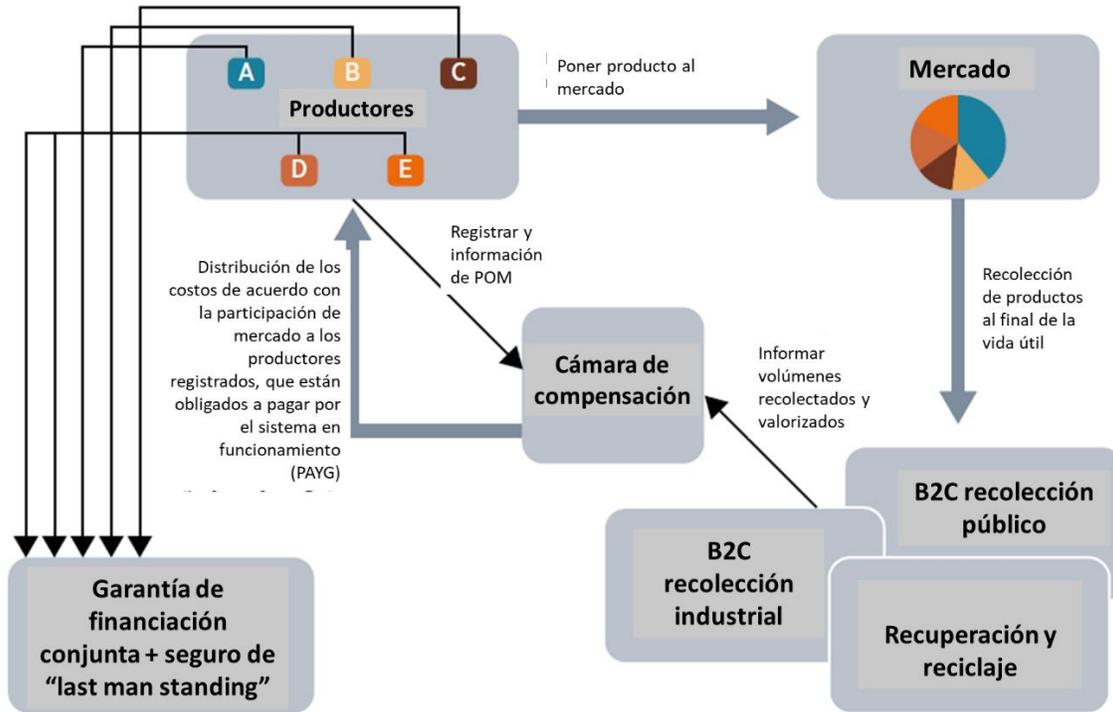
Fin del estatus de “residuo”:

Se define cuando un material es un “residuo” y el momento de cuando este material deje de ser residuo a partir de cumplir estos criterios.

- El material ha pasado por un proceso de recuperación
- El material se usa para ciertos fines,
- Hay un mercado o demanda
- Se cumplen ciertos requisitos técnicos y legales

El uso del material es inofensivo.

Figura 16: Sistema de responsabilidad colectiva del productor (sistema de gestión REP) para la gestión del final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos B2C⁴⁰



4.2.3 España

España igualmente como Alemania han implementado la Directiva Europea en su normativa nacional a través del Real Decreto 110/2015.

Se han adoptado las definiciones y obligaciones según esta directiva, sin embargo, la implementación de la responsabilidad de los productores sobre el fin de vida acoge a otra metodología que Alemania.

⁴⁰ Fuente: (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016)

Tabla 10: Regulación de España en cuanto a tratamiento de módulos FV

Normativa	Contenido relevante para módulos FV
<p><i>Real Decreto 110/2015 sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos</i></p>	<p>Vigencia: La Directiva Europea 2012/19/UE y la Directiva 2011/65/UE se implementó en España mediante el Real Decreto 110/2015. Desde el 21 de febrero de 2015 hasta el 14 de agosto de 2018, se estableció un período de transición donde el alcance del Real Decreto 110/2015 es similar al del anterior Real Decreto 208/2005. Desde el 14 de agosto 2018 está vigente el Real Decreto 110/2015.</p> <p>Alcance: Se destaca la adopción de una regulación específica que permita aumentar la seguridad jurídica y establezca las correspondientes obligaciones de las principales figuras que intervienen en el proceso de la gestión de residuos como pueden ser los consumidores, productores, importadores, distribuidores y gestores, de manera que se garantice la unidad de mercado y los criterios de gestión.</p> <p>La normativa indica la necesidad de disponer de instalaciones adecuadas para el depósito y almacenamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, implicando la recolección de estos a los distribuidores y entidades locales. Por otra parte, en aplicación del principio de “quien contamina paga” (REP), se obliga al fabricante a financiar la gestión de los residuos que proceden de sus aparatos. (Moreno, 2017)</p> <p>Metas para la recolección: El real decreto se acoge a la Directiva Europea en cuanto a establecer objetivos de recolección para los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) fuera de uso según el año a partir de la aplicación de la normativa.</p> <p>Base de datos para la trazabilidad: El real decreto integra una base de datos que permite acceder al cumplimiento de los</p>

objetivos, lo cual garantiza la trazabilidad del residuo y su adecuada gestión durante el tratamiento. Esto busca optimizar la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, además de aumentar la competitividad del sector de los fabricantes y de los gestores. Cabe destacar que también promueve la reutilización, de forma que estimula la creación de centros destinados a tal fin y la generación de empleo en el sector.

Definiciones en la Ley relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV:

Inclusión de los paneles fotovoltaicos: se establecen 10 categorías de AEE, donde los módulos fotovoltaicos constituirán la séptima categoría, bajo cual se diferencia entre módulos FV de de silicio y los módulos FV de telurio de cadmio (CdTe).

La razón de este cambio se debe a que los módulos fotovoltaicos presentan una mayor vida útil y características diferentes en comparación a otros AEE, de manera que se deben separar del resto para no alterar las cuotas y los objetivos de recolección.

Responsabilidad financiera de los productores sobre la gestión de los RAEE:

También obliga a los fabricantes o productores a asumir los costes de gestión en relación con los residuos generados por los AEE. Esto se implementa en forma de una tasa adherida al precio a pagar por el consumidor a la hora de comprar el dispositivo, con motivo del reciclaje de este.

Además, impone menos cargas administrativas con el fin de aclarar los requisitos necesarios, acelerar los registros de productores y disminuir los gastos derivados de los mismos.

4.2.4 Japón

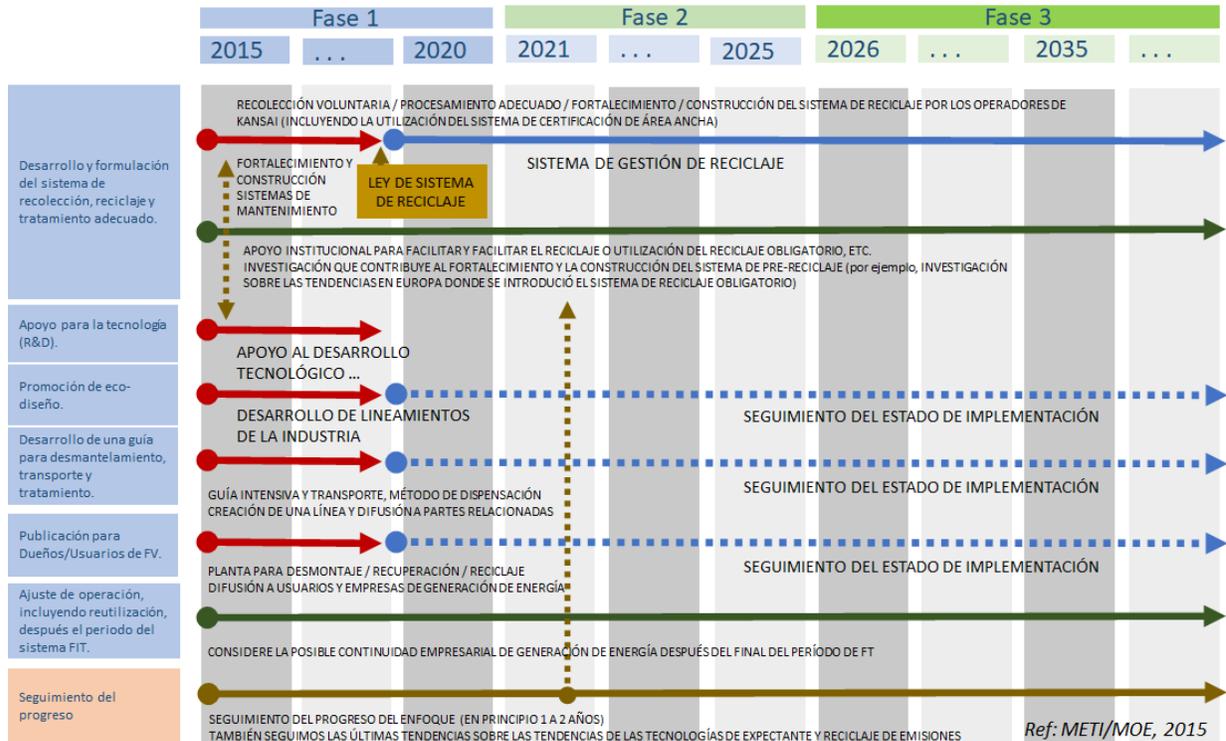
En el caso de Japón, según la bibliografía revisado, actualmente todavía no existe una normativa o regulaciones específicas para los residuos de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, existen regulaciones de residuos en general y otros documentos elaborados por los Ministerio de Medio

Ambiente (MOE) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI). Otra autoridad que juega un rol en la elaboración de regularizaciones en el tema es el Ministerio de Asuntos internos y Comunicaciones (MIC).

Tabla 11: Regulación de Japón en cuanto a tratamiento de módulos FV

<i>Normativa</i>	<i>Contenido relevante para módulos FV</i>
<p><i>"Ley de Gestión de Residuos y Limpieza Pública"</i></p>	<p>Vigencia: La primera versión e este Laye se promulgó en los 1970 y en la actualidad está vigente su enmienda de junio 1997.</p> <p>Alcance: Los módulos fotovoltaicos de residuos deben ser tratados bajo el marco regulatorio general para la gestión de residuos: "La Ley de Gestión de Residuos y Limpieza Pública" (Komoto, 2018) La ley prescribe definiciones de residuos, responsabilidades de los generadores y gestores de residuos industriales, manejo de residuos industriales, incluida la eliminación de vertederos, cuales son un problema grande todavía en japón.</p>
<p><i>"Ley de Reciclaje de Residuos de Construcción" (METI y MOE, 2015)</i></p>	<p>Vigencia: Este Ley está vigente desde el año 2000</p> <p>Alcance: La Ley Fundamental para la Creación de una Sociedad basada en el Reciclaje de Recursos sirve de base a un enfoque integral y sistemático en el tratamiento y el reciclaje de residuos. A esta ley le siguieron una serie de nuevas disposiciones legales relacionadas con el reciclaje que cubrían campos específicos como los electrodomésticos, los residuos de alimentos, los materiales de construcción, los automóviles y los ordenadores personales</p> <p>Definiciones en la Ley relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV: Esta Ley prescribe cómo gestionar los residuos de construcción y desmantelamiento. La Ley exige la recuperación y el reciclaje de hormigón, madera y materiales de construcción (que contengan hormigón,</p>

hierro y asfalto). Aunque los módulos FV no están específicamente identificados en la Ley, los módulos fotovoltaicos integrados con material de construcción pueden requerir reciclaje, de acuerdo con las interpretaciones actuales. Los módulos en plantas fotovoltaicas montadas en el suelo no se ven afectados por esta regulación. Sin embargo, los componentes del sistema hechos de concreto o hierro también estarían sujetos a la ley. (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016)



4.2.5 Estados Unidos: Estados de California y Washington

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

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

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

Tabla 12: Regulación de Estados de California y Washington en cuanto a tratamiento de módulos FV

Normativa

Contenido relevante para módulos FV

<p><i>Ley de Conservación y Recuperación de Recursos, (Resource Conservation and Recovery Act, 1976)</i></p>	<p>Alcance: Contiene el marco regulatorio general para la gestión de residuos: Define dos tipos de residuos peligrosos: Residuos peligrosos característicos y residuos peligrosos definidos en una lista. Los modulo FV no están listados como residuo peligroso, entonces deben que sumergirse a un procedimiento de lixiviación característica de toxicidad del método. (ver abajo) (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016)</p>
<p><i>“Proyecto de ley 489 del Senado” de California, 2015</i></p>	<p>Vigencia: Este Ley está vigente desde el 1 de octubre 2015</p> <p>Alcance: Un acto para agregar el Artículo 17 (que comienza con la Sección 25259) al Capítulo 6.5 de la División 20 del Código de Salud y Seguridad, relacionado con los residuos peligrosos. Si se aprueba este proyecto de ley por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, autorizará al Departamento de Control de Sustancias Tóxicas de California a cambiar la clasificación de los módulos fotovoltaicos solares al final de su vida útil identificados como residuos peligrosos a residuos universales. (IRENA and IEA-PVPS Task 12, 2016)</p>
<p><i>Proyecto de Ley de Estado de Washington “Proyecto de ley 5939 del Senado”, 2017</i></p>	<p>Vigencia: Este Ley está vigente des del 1 de Julio 2017</p> <p>Alcance: Este proyecto tiene el objetivo de promoción de una industria local de energía renovable sostenible mediante la modificación de los incentivos fiscales del sistema de energía renovable y brindando orientación para el reciclaje de componentes del sistema de energía renovable.</p> <p>Definiciones en la Ley relevantes para la gestión de los residuos de módulos FV: En la sección 12 de la Ley se encuentran los requisitos de forma REP sobre los residuos de módulos FV: “La legislatura considera que es un</p>

sistema conveniente, seguro y ecológico para el reciclaje de módulos fotovoltaicos. Se debe establecer la minimización de los residuos peligrosos y la recuperación de materiales comercialmente valiosos. Además, la legislatura considera que la responsabilidad de este sistema debe ser compartida entre todos los interesados, y los fabricantes financian el sistema de devolución y reciclaje.” (State of Washington, 2017)

Contenido de este Ley correspondiente a los temas del estudio son:

- Definición de productores: la definición incluye una amplia gama de posibilidades como comercialización en el mercado nacional, bajo el nombre de marco o propia marca, no solo por primera vez, pero incluyendo la reventa de módulos completos, en partes o reajustados para reutilización de cualquier forma en un mercado secundario. Además, incluye una figura de un responsable en lugar del productor original.
- Productores que quieren introducir sus módulos fotovoltaicos en el estado de Washington después del 1 de julio de 2017, son responsables de entregar y recibir aprobación de un plan de gestión (stewardship plan) y proporcionar financiamiento al programa de reciclaje para sus unidades.
- Productores de módulos fotovoltaicos que no proporcionen los detalles de su plan de reciclaje no permitirán vender módulos solares después del 1 de enero de 2021.
- Se puede formar sistemas de gestión como agentes de los productores (stewardship organizations).
- Los productores pueden optar para un programa nacional que cumple con los mismos requisitos que los requisitos en el estado de Washington.
- Metas: Tasa de reutilización y reciclaje combinado: 85% del peso de los módulos fotovoltaicos recolectados

- El plan de gestión debe que incluir: plan de financiar transporte, recolección, reciclaje, gestión administrativo y disposición en caso de no valorización. Plan sobre la minimización de impacto medio ambiental y maximización de recuperación de tierras raras y materiales valiosos.
- Educación y información de todos los stakeholders

4.3 Comparación con el caso chileno

A modo de resumen, se procede a comparar los resultados de la regulación de otros países y estados con el caso chileno. Este corresponde a un primer ejercicio de comparación, en vista de que en el siguiente entregable del estudio se procederá a realizar las propuestas respectivas de como cerrar tales brechas.

A continuación, en la siguiente tabla se realiza tal comparación, principalmente en cuanto a cuatro puntos: (i) responsabilidad de productores, (ii) sistemas de gestión REP, (iii) metas de recolección y valorización y (iv) categorías y subcategorías.

Tabla 13: Comparación de la regulación revisada con el caso chileno.

	EEUU	Japón	Alemania	España	Chile
Responsabilidad de productores	En Washington se establece la responsabilidad para aquel que comercializa por primera vez un producto. Incluye la reventa de módulos FV, la comercialización de sus partes o la venta de módulos reacondicionados para su reutilización. Además, incluye una figura de un responsable en lugar del productor original.	En Japón más que obligaciones existen recomendaciones y buenas prácticas para productores, usuarios y propietarios, instaladores, incluso las autoridades locales.	En la normativa europea, además de la definición estándar del productor, se considera para los residuos de módulos FV la figura de un productor representante. En caso de no existir un productor en el país, los productores están obligados a tener un representante que asuma y asegure el cumplimiento de las obligaciones.		En Chile, la Ley 20.920 establece la responsabilidad a los productores, en rigor, los defines como aquellos que enajenan un producto por primera vez. Debido a que los módulos FV tienen una duración de más de 30 años, y muchas veces, la propiedad de las plantas o instalaciones fotovoltaicas se traspasan, la autoridad deberá analizar esta situación particular y ampliar la responsabilidad o incorporar la exigencia de traspaso de esta responsabilidad para asegurar el cumplimiento de las obligaciones.
Sistemas de Gestión REP	El Estado de Washington, en su normativa faculta a los productores a que formen SG para gestionar los residuos de módulos FV. Es decir, no están obligados a organizarse como SG. No obstante, esto no libera de las obligaciones a los productores, quienes están obligados a generar un plan de gestión de estos residuos y financiar las iniciativas de manejo de estos.	Están desarrollando sistemas de recolección, tratamiento y reciclaje adecuado.	En Alemania, los productores están obligados a conformar y financiar los SG que deben organizar esquemas de recolección y reciclaje.	En España se establece la obligatoriedad para los productores de conformar y financiar los SG que tengan a su cargo las obligaciones de recolección y valorización.	En Chile, la Ley N° 20.920 establece la obligación para los productores de conformar Sistemas de Gestión para financiar los esquemas de recolección y valorización.
Metas de recolección y valorización	Sólo existen metas en el Estado de Washington Metas: Tasa de reutilización y reciclaje combinado: Tasa de reciclaje y reutilización de 85% del peso del total de los módulos fotovoltaicos recolectados.	No hay metas	85% de recolección y 80% de lo recolectado para preparación para reutilización o reciclaje.	En España tienen la misma meta que establece la Directiva 2002/96/CE, europea. Se establece un 65% del volumen puesto en el mercado o el 85% de los residuos generados.	En Chile las metas de recolección y reciclaje serán establecidas en un reglamento de metas. Un punto importante que deberá analizar la autoridad es el tipo de responsabilidad considerando la duración de los paneles FV. Esto es, metas dirigidas a lo puesto en el mercado o metas dirigidas a la generación de residuos.
Categorías y subcategorías	N/A	N/A	En Alemania los paneles FV se consideran categoría 4.: dispositivos grandes en los que al menos una de las dimensiones exteriores es mayor de 50 cm. Adicionalmente, en su normativa se especifican distintos grupos o categorías para su recolección. En el caso de los paneles FV, estos pertenecen al grupo 6, que implica que se deben recolectar de forma separada a otros residuos.	El Real Decreto 110/2015, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos se establece una nueva categorización que incluye a los paneles fotovoltaicos en una categoría aparte dada la singularidad de este tipo de aparatos, de larga vida media y perfil profesional para que no distorsione las cuotas y objetivos de recogida anuales del resto de aparatos eléctricos con características más similares.	En el transitorio segundo de la ley 20.920 se establece la obligación de declarar a los productores de AEE las 6 categorías, donde paneles FV corresponden a la categoría 4. En este se establece la categoría de paneles fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm). A su vez se indica una subcategoría en cuanto a su composición: paneles fotovoltaicos con silicio y paneles fotovoltaicos con telurio de cadmio.

5 Referencias

- Arvind Sharma, S. P. (2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 597-610.
- Asociación de Normalización Española. (1 de Diciembre de 2017). *UNE-EN 50625-2-4:2017 (Ratificada)*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059305>
- Barrera, M., Pajares, L., Clemente, Ó., de Castro, A., López, V., & Fuentes, F. (2007). *Fabricación de Paneles Solares Fotovoltaicos*. Universidad de Jaume, España.
- California Legislative Information. (1 de Octubre de 2015). *SB-489 Hazardous waste: photovoltaic modules*. Obtenido de https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160SB489
- Chowdhury, S., Sajedur Rahman, K., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., . . . Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*.
- CNE. (27 de Mayo de 2020). *CNE - Estadísticas Electricidad*. Obtenido de Capacidad Instalada de Generación: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>
- CNE. (2020). *Reporte Mensual Sector Energético*.
- Dias, P., & Veit, H. (2019). Recycling Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Emerging Photovoltaic Materials*, 61-102.
- Dias, P., Schmidt, L., Bonan Gomes, L., Bettanin, A., Veit, H., & Moura Bernardes, A. (2018). Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*.
- Energia Abierta. (14 de 05 de 2020). *Generacion Distribuida - Instalaciones Inscritas*.
- EPA. (Agosto de 2019). *A Survey of U.S. Policies and Initiatives*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/heath_2_state_programs_0.pdf
- European Commission. (27 de Enero de 2003). DIRECTIVA 2002/95/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 37/19-L 37/23.
- European Commission. (19 de Noviembre de 2008). DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 312/3- L 312/30.
- Eurostat. (2020). *Secondary Material Price Indicator*. Obtenido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Recycling_%E2%80%93_secondary_material_price_indicator#Price_and_trade_volumes

- First Solar. (2017). *The Recycling Advantage*.
- Fthenakis, V., & Zweibel, K. (2017). CdTe PV: Real and Perceived EHS Risks. En N. C. Meeting (Ed.).
Obtenido de www.nrel.gov/docs/fy03osti/33561.pdf
- IEA. (2018). *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*.
- IEA. (Julio de 2020). *International Energy Agency - Countries*. Obtenido de
<https://www.iea.org/countries/germany>
- IRENA. (2016). *End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels*.
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA and IEA-PVPS Task 12. (2016). *End-of-Life_Solar_PV_Panels*.
- Komoto, K. (29 de November de 2018). PV Recycling in Japan. *IEA PVPS Task12: PV Sustainability*.
Tokyo, Japan: Mizuho Information & Research Institute, Inc.
- Latunussa, C., Mancini, L., Blengini, G., Ardente, F., & Pennington, D. (2016). *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels*.
- McKinsey Global Institute. (21 de Agosto de 2017). *China's renewable energy revolution*. Obtenido
de <https://www.mckinsey.com/mgi/overview/in-the-news/china-renewable-energy-revolution#>
- Ministerio de Energía. (9 de Junio de 2020). *Planificación Energética de Largo Plazo*. Obtenido de
<https://www.energia.gob.cl/planificacion-energetica-de-largo-plazo-escenarios-energeticos>
- Mizuho Information & Research Institute, Japan. (2016). Approaches to PV Waste Management.
Workshop on PV End-of-Life Management. Munich, Alemania.
- Moreno, C. E. (2017). *Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos*. Santa Cruz de Tenerife: Universidad de la Laguna.
- NC Clean Energy Technology Center. (2017). *Health and Safety Impacts of Solar Photovoltaics*. NC State University.
- NREL. (2012). Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- Palitzsch, W., & Loser, U. (2014). Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen (Integrated reuse of high-tech and green-tech waste). *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge*, 173-81. Obtenido de http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39704-2_12
- Pinho JT, G. (2014). Engineering manual for photovoltaic systems retrieved from Rio de Janeiro: CEPEL—CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.
- PV Cycle. (2018). *Annual Report*.

- PV Cycle. (13 de Julio de 2020). *PV Cycle Association*. Obtenido de <http://www.pvcycle.org/es/>
- Sharma, A., Pandey, S., & Kolhe, M. (17 de Julio de 2019). Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 597-610. doi:10.12720/sgce.8.5.597-610
- Sica, D., Malandrino, O., Supino, S., Testa, M., & Lucchetti, M. (2018). Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2934-2945.
- Solar Energy Industries Association. (2019). *PV End-of-Life Management*.
- Solar Energy Industries Association. (13 de Julio de 2020). *SEIA National PV Recycling Program*. Obtenido de <https://www.seia.org/initiatives/seia-national-pv-recycling-program>
- Solarity. (10 de Junio de 2020). *Trends for PV Industry in 2020*. Obtenido de <https://solarity.cz/blog/trends-for-pv-industry-in-2020/>
- State of Washington. (17 de Julio de 2017). ENGROSSED SUBSTITUTE SENATE BILL 5939. *RENEWABLE ENERGY--TAX INCENTIVES--FEES*. Seattle, Estado de Washington , Estados Unidos.
- U.S. Department of Energy. (14 de Mayo de 2020). *Solar Energy Technologies Office*. Obtenido de Cadmium Telluride: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- Union Europea. (4 de Julio de 2012). *Diario Oficial de la Union Europea*. Obtenido de Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- VDMA. (2019). *International Technology Roadmap for Photovoltaic*.