



Informe 1

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 (MMA)

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	7
3 Línea base de proyectos y módulos FV	8
3.1 Metodología y fuentes de información.....	8
3.2 Supuestos y aproximaciones	10
3.3 Módulos FV en Chile.....	12
4 Composición de módulos FV	15
4.1 Tipos y materiales de módulos FV.....	15
4.2 Caracterización de materiales.....	17
4.2.1 Módulos basados en Silicio	17
4.2.2 Módulos de capa fina	22
4.3 Caracterización de módulos instalados en Chile.....	24
4.4 Caracterización y cuantificación de materiales reutilizables, reciclables, no reciclables y descartables	25
4.4.1 Introducción a las alternativas de reutilización y reciclaje de módulos FV	25
4.4.2 Fin de vida útil de módulos fotovoltaicos	27
4.4.3 Reutilización	29
4.4.4 Reciclaje.....	30
5 Proyección de módulos al 2050	32
5.1 Escenarios de proyección.....	32
5.2 Supuestos tecnológicos y materiales	34
5.2.1 Materialidad del módulo.....	35
5.2.2 Eficiencia del módulo	36
5.2.3 Tecnología del módulo	37
5.3 Proyección de módulos FV por tipo	37
5.4 Escenarios de reutilización y reciclaje.....	42
6 Referencias.....	43
7 Anexos	44
7.1 Respuestas entrevistas.....	44
7.2 Base datos de proyectos y módulos FV.....	44

Acrónimos

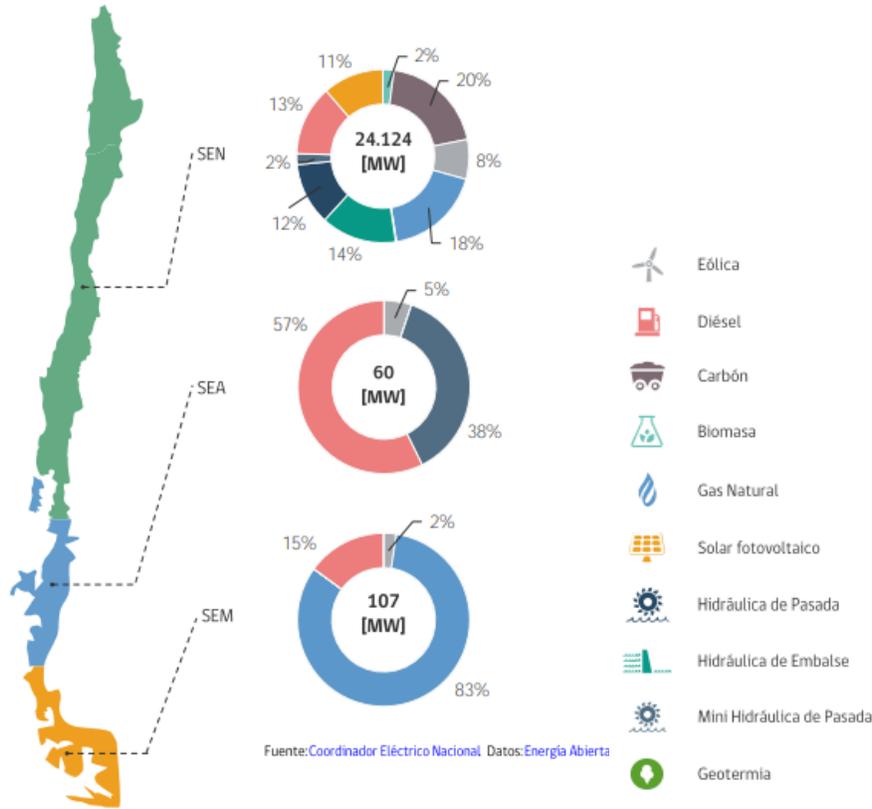
CdTe	Teluro de Cadmio
CIGS	Cobre, Indio, Galio, Selenio
CNE	Comisión Nacional de Energía
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
GIS	Galio, Indio, Selenio
GW	Gigawatt
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
PELP	Planificación Energética de Largo Plazo
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell
PMGD	Pequeños Medios de Generación Distribuida
PMG	Pequeños Medios de Generación
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
Si	Silicio

1 Introducción

Chile cuenta con uno de los mayores potenciales de energía solar del mundo, 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



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, 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.

¹ Fuente: (CNE, 2020)

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, dadas las regulaciones ambientales que se han 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, sea de la forma más amigable con el medio ambiente.

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 1 del estudio “Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil”. Esta entrega aborda las actividades asociadas al objetivo específico 1 de las bases técnicas, en cuanto a “caracterizar y cuantificar los materiales que componen los módulos fotovoltaicos de proyectos desarrollados en Chile y proyectarlos al 2050”. Tales actividades son:

- Realizar un levantamiento de los proyectos fotovoltaicos que se encuentran instalados, aprobados y en evaluación en Chile, la proyección de instalación de esta tecnología, desde estudios internacionales u otras fuentes de información, con horizonte al 2050, tanto a nivel residencial, como conexión de pequeños medios de generación distribuida (PMGD) y *utility scale*.
- Describir detalladamente las fuentes de información, procedimientos, técnicas e instrumentos de trabajo utilizados en el levantamiento y proyección de información. Considerar tanto fuentes de información privadas como públicas, y en este último punto, se debe considerar, entre otros la Planificación Energética a Largo Plazo (PELP) del Ministerio de Energía.
- Caracterizar y cuantificar los elementos que componen los módulos fotovoltaicos considerando las diferentes tecnologías, tales como policristalino, monocristalino, perovskita y bifaciales, indicando el porcentaje de los componentes que se encuentran en mayor proporción, cantidad, volumen y peso y los que son críticos y/o medioambientalmente peligrosos.
- Cuantificación y caracterización de los materiales que son reciclables, reutilizables o que se pueda aplicar alguna otra alternativa de valorización, en peso, volumen y su proyección acorde a los determinados en el punto anterior. Así como también indicar una solución para los componentes no reciclables, reparables o reutilizables.
- Cuantificar el volumen de módulos que se den de baja, pero que pueden tener un segundo uso.
- Realizar una proyección de los elementos que componen un módulo fotovoltaico, cantidad, volumen y peso al 2050.
- Se requiere tanto la cuantificación y caracterización de los materiales que son descartables, en peso y volumen, como los que son reparables y/o recuperables, y que puedan ser comercializados. Así como también indicar una solución para los residuos componentes no reciclables, reparables o reutilizables.

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 Línea base de proyectos y módulos FV

En Chile, a abril de 2020, existen casi 3 [GW] de capacidad instalada de la tecnología solar fotovoltaica². Tal como se mencionó anteriormente, se espera que en los próximos años tal capacidad instalada aumente, tomando un rol de relevancia en el sistema eléctrico chileno.

Dado lo anterior es que, a partir de la información disponible en la actualidad, se procede a construir una línea base de los módulos fotovoltaicos instalados en Chile, identificando su tipo y tecnología. A continuación, se describen los pasos llevados a cabo para construir tal línea base, los supuestos adoptados con su respectiva justificación y los resultados obtenidos.

3.1 Metodología y fuentes de información

En una primera instancia, y según lo detallado en las bases técnicas del estudio, se procedió a definir qué tipo de proyectos solar fotovoltaicos serán considerados en la línea base. En vista de ello, se definió la siguiente nomenclatura y tipologías de proyectos:

- Gran Escala o Utility Scale: Proyectos solares fotovoltaicos conectados a redes de transmisión nacional o dedicadas del Sistema Eléctrico Nacional.
- PMG: Proyectos solares correspondientes a Pequeños Medios de Generación conectados a redes de transmisión zonal menores a 9 [MW].
- PMGD: Proyectos solares correspondientes a Pequeños Medios de Generación Distribuida conectados a redes de distribución menores a 9 [MW].
- Netbilling: Proyectos solares de generación distribuida menores a 300 [kW] según lo determinado en la Ley 21.118.

En vista de esta de esto, es que se procedió a levantar los proyectos existentes en cada una de las tipologías consideradas. Para los proyectos del tipo Gran Escala, PMG y PMGD se procedió a utilizar la información de capacidad instalada de generación proveniente de (CNE, 2020) actualizada a marzo de 2020, de donde se extrajo los siguientes parámetros:

- Nombre del proyecto
- Región
- Comuna
- Capacidad instalada bruta
- Año de puesta en servicio

Asimismo, para el levantamiento de los proyectos del tipo Netbilling, se extrajo la información de la base de datos de instalaciones de generación distribuida declaradas ante la SEC disponible en

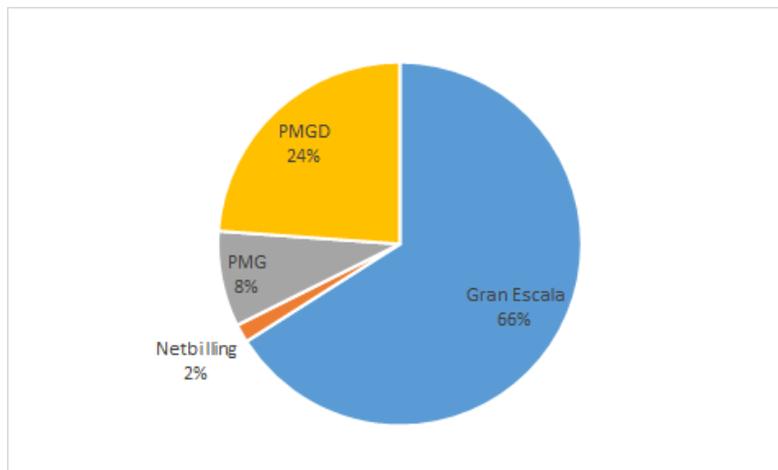
² Fuente: Elaboración propia, en base a (CNE, 2020) y (Energía Abierta, 2020). Información a marzo 2020.

(Energía Abierta, 2020) que se alimenta con información de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). De allí se extrajo la siguiente información de cada proyecto solar fotovoltaico:

- Región
- Comuna
- Fecha de ingreso
- Capacidad instalada

Con ambas bases de datos, fue posible contar con una caracterización, a marzo de 2020, de la capacidad instalada de proyectos solares fotovoltaicos según las tipologías definidas previamente. En donde se aprecia que, de los casi 3 [GW] de capacidad instalada solar fotovoltaica, un 66% corresponde a proyectos de gran escala, los cuales corresponden a 29 proyectos. Esto contrasta con el restante 34% de capacidad instalada solar fotovoltaica, ya que esta corresponde a 6,173 proyectos.

Figura 2: Distribución de la capacidad instalada de proyectos fotovoltaicos según tipología del estudio a marzo 2020³



Una vez construida la base de datos de proyectos fotovoltaicos existentes en el país, se procedió a levantar información con la finalidad de caracterizar la tecnología de módulos fotovoltaicos que empleó cada uno de estos proyectos. Este punto es clave en la construcción de la línea base, dado que, tal como se detalla posteriormente, la tecnología de los módulos fotovoltaicos desencadena en su materialidad y composición.

La información sobre el tipo de módulos fotovoltaicos empleados por cada proyecto fue levantada de diversas fuentes de información:

³ Fuente: Elaboración propia a partir de (CNE, 2020) y (Energía Abierta, 2020)

- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental:

Según la legislación ambiental del país, todo proyecto de central generadora de energía mayor a 3 [MW] de capacidad instalada debe elaborar una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Asimismo, en tales instrumentos se debe entregar una caracterización detallada del proyecto en cuestión, entregando datos de diseño, emplazamiento y funcionamiento.

En vista de esto, para los proyectos fotovoltaicos de capacidad mayor a 3 [MW] levantados en la base de datos, fue posible identificar el tipo de módulo fotovoltaico empleado en cuanto a si estos son monocristalinos, policristalinos o de capa fina. Asimismo, fue posible levantar información acerca del número de módulos fotovoltaicos aproximados contemplados en el proyecto.

- Superintendencia de Electricidad y Combustibles:

Según la normativa del sector eléctrico chileno, todas las instalaciones que se quieran acoger a la Ley N°21.118 del año 2018 (“Ley de Generación Distribuida”) deben declarar a la SEC su puesta en servicio, mediante el formulario TE4. En este formulario se debe entregar toda la información técnica del proyecto, en la que se incluye el tipo de tecnología de los “convertidores” de energía de la instalación.

Es desde la base de datos que concentra todas las instalaciones inscritas con formulario TE4, donde se extrajo la información del tipo de módulo fotovoltaico, para proyectos de hasta 300 [kW] (máximo permitido para acogerse a la Ley 21.118). Cabe mencionar que tal base de datos fue proporcionada directamente por profesionales de la SEC, por intermedio de la contraparte técnica del estudio.

- Información directa de empresas y proyectos:

Para proyectos que no fue posible identificar el tipo de módulos fotovoltaicos empleados (rango entre 300 [kW] y 3 [MW]), se procedió a realizar una búsqueda mediante información amplia de sitios webs de las respectivas empresas. Cabe señalar que tal rango de proyectos, según la base de datos levantada, pertenecen al tipo de Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD).

3.2 Supuestos y aproximaciones

Si bien mediante las fuentes descritas anteriormente, fue posible construir una primera versión de la base de datos de módulos fotovoltaicos instalados en Chile, existen diversos vacíos de información o incompletitud de datos. Asimismo, para tales casos se asumieron supuestos y

aproximaciones, que permitiesen contar con una caracterización completa de las tecnologías de módulos fotovoltaicos empleada y su cantidad.

A continuación, se exponen los vacíos e inconsistencias de información encontradas, junto con los supuestos asumidos para abordarlas.

Tabla 1: Vacíos de información y supuestos asumidos.

Fuente de Información / Dato	Información faltante	Supuesto
Servicio de Evaluación Ambiental	En algunos proyectos fotovoltaicos mayores a 3 [MW] (18% del total ingresado al SEIA), no se informa la tecnología de módulos fotovoltaicos empleada.	Se asume la tecnología de mayor presencia en el mercado, la cual es la del tipo policristalino.
Servicio de Evaluación Ambiental	En algunos proyectos fotovoltaicos mayores a 3 [MW] (8% del total ingresado al SEIA), no se informa el número de módulos a instalar.	Se asume la potencia entregada por módulos que son ofrecidos actualmente en el mercado. 1 módulo equivale a 305 [W].
Servicio de Evaluación Ambiental	La potencia informada en las DIA y EIA de los diversos proyectos fotovoltaicos mayores a 3 [MW], difiere de lo informado por la CNE en cuanto a la capacidad instalada de proyectos en operación. Esta diferencia también entrega incerteza al dato informado sobre módulos fotovoltaicos.	Por medio de una inspección uno a uno de los proyectos, se determinó que para los casos en donde existía una diferencia de más de 20% entre la capacidad instalada informada, el número de módulos fotovoltaicos se estimó mediante la relación de que 1 módulo equivale a 305 [W]. En cuanto a la capacidad instalada, en todos los casos, se asume lo informado por la CNE.
Servicio de Evaluación Ambiental	Algunos de los proyectos mayores a 3 [MW] en su descripción en las respectivas DIA o EIA (26% del total), señalan que la tecnología de módulos empleadas es “cristalina”.	Se asume que la tecnología empleada corresponde a policristalinos.
Superintendencia de Electricidad y Combustibles	En más del 97% de los proyectos informados en la base de proyectos con formulario TE4 aprobado, no se informa la tecnología del módulo fotovoltaico.	En la base de la SEC se informa la marca del módulo fotovoltaico y su modelo, por lo que, por medio de lo informado por el fabricante, se concluye el tipo de módulo.
Superintendencia de Electricidad y Combustibles	En la base de datos de la SEC en que se informa la tecnología del módulo fotovoltaico, solo se entrega información para proyectos inscritos a partir del año 2018.	Para los proyectos netbilling previos al año 2018, se asume la tecnología de módulos fotovoltaicos policristalinos.
Tecnología de módulos de proyectos entre 300 kW a 3 MW	Tal como se mencionó, estos proyectos no se deben ingresar al SEIA y tampoco son	Se realizó una revisión en sitios webs de las respectivas empresas y reportes

	<p>informados en el marco de la Ley 21.118 por lo que no se cuenta con información oficial sobre la tecnología de módulos empleadas.</p>	<p>independientes sobre estos proyectos, con tal de extraer la información. Se asume, para los proyectos en que no se encontró información, que la tecnología predominante es policristalinos.</p>
--	--	--

Además, de los supuestos asumidos, cabe mencionar que, a modo de utilidad para los siguientes entregables del estudio, fue posible levantar la vida útil declarada de los diversos proyectos y si estos cuentan con un plan, declarado, de manejo de módulos fotovoltaicos una vez se llegue al fin de ella. Esta información fue recogida desde los diversos Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) que las empresas han sometido al SEIA. En tales documentos las empresas describen una vida útil estimada de cada proyecto y si contemplan o no un plan para el desmantelamiento de la central. Cabe señalar que tal información es declarativa de las empresas y en ningún caso mencionan la metodología para estimar tal vida útil y si los módulos fotovoltaicos dejarán de funcionar una vez se cumpla.

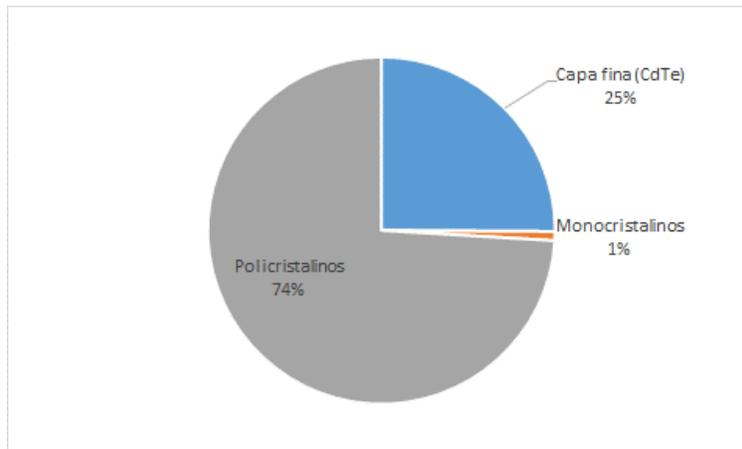
3.3 Módulos FV en Chile

A partir de la información levantada de proyectos fotovoltaicos, a la información de tecnologías de módulos y los supuestos descritos anteriormente, fue posible construir una base de datos de módulos fotovoltaicos instalados en Chile y conectados a la red.

De tal resultado, fue posible concluir que, a marzo del año 2020, en Chile se encuentran instalados cerca de 12,508,000 módulos fotovoltaicos. Estos, según lo descrito anteriormente, representan casi 3 [GW] de potencia instalada conectada a la red eléctrica. Asimismo, tales módulos se concentran principalmente en tres tecnologías: Monocristalinos, Policristalinos y Capa Fina (CdTe⁴), según como se indica en la siguiente figura.

⁴ Cadmio-Telurio

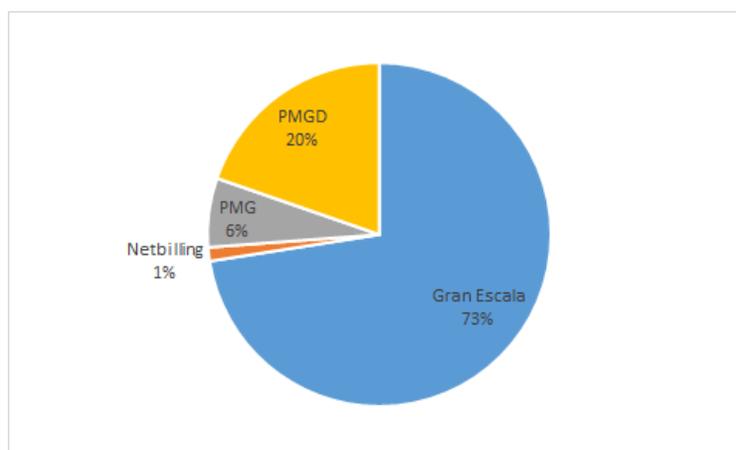
Figura 3: Participación del tipo de módulos en total de módulos fotovoltaicos instalados en Chile a marzo de 2020.⁵



Según la información levantada, se tiene que un 74% de los módulos fotovoltaicos instalados en el país a la fecha, corresponden a módulos policristalinos, seguidos por los del tipo Capa Fina (CdTe) con un 25% y, por último, los del tipo monocristalinos (1%).

Otro aspecto interesante de analizar es en qué tipo de proyectos se encuentran instalados los módulos. En este sentido, según se muestra en la siguiente figura, se tiene que, del total de módulos fotovoltaicos, la gran mayoría (73%) están dispuestos en proyectos de gran escala (mayor a 9 [MW]), seguidos de proyectos PMGD, PMG y Netbilling, respectivamente.

Figura 4: Distribución de módulos fotovoltaicos instalados en Chile por tipo de proyecto⁶



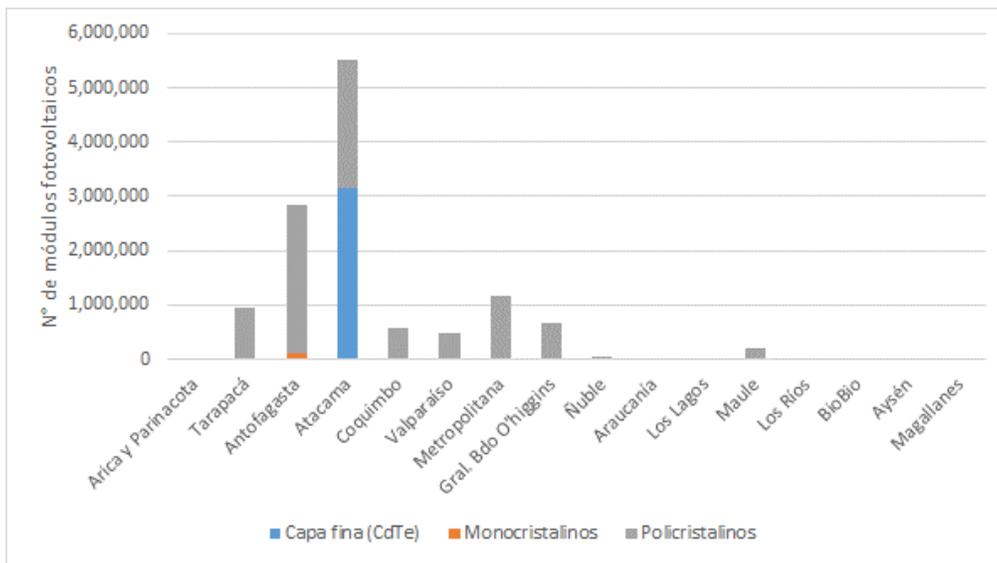
Por último, cabe analizar la distribución territorial de los módulos instalados en el país, la cual se condice directamente con la presencia regional de proyectos fotovoltaicos. Siendo que

⁵ Fuente: Elaboración propia

⁶ Fuente: Elaboración propia

mayoritariamente el mayor número de módulos fotovoltaicos se encuentra en la región de Atacama (44% del total nacional). Asimismo, en la región de Atacama se encuentran prácticamente la totalidad de los módulos del tipo Capa Fina (CdTe) instalados en el país, lo que se debe principalmente a la presencia de los proyectos Luz del Norte (141 [MW]) y PFV Carrera Pinto (93 [MW]), con casi 2,930,000 módulos de esta tecnología, ambos puestos en operación en el año 2016. La instalación de este tipo de módulos no es la tendencia imperante en el mercado chileno y estos dos proyectos corresponden a desarrollos puntuales.

Figura 5: Distribución regional de módulos fotovoltaicos por tipo.⁷



⁷ Fuente: Elaboración propia.

4 Composición de módulos FV

Luego de identificados los módulos existentes en el país, es necesario realizar una revisión de la materialidad y funcionamiento general de cada uno de ellos, con tal de poder caracterizar de que elementos están compuestos. Esto permitirá analizar los diversos materiales, su composición y posteriormente identificar si los residuos pueden ser valorizados o eliminados de acuerdo con la normativa vigente.

Cabe señalar que, dado el foco con el que cuenta el presente estudio, solo se consideró la caracterización del módulo fotovoltaico y no de otras componentes de los proyectos de este tipo, como lo son los inversores, estructuras de seguimiento, transformadores y otros.

4.1 Tipos y materiales de módulos FV

El proceso físico de generación de electricidad por medio de luz funciona mediante la juntura de dos tipos de materiales semiconductores, uno “p” y otro “n”, esta juntura “p-n” en presencia de luz es capaz de generar una diferencia de potencial eléctrico. Bajo este contexto se buscan materiales semiconductores que puedan ser fabricados con relativa sencillez, con costos de producción bajos, con disponibilidad y que el tengan alto potencial de generación de electricidad.

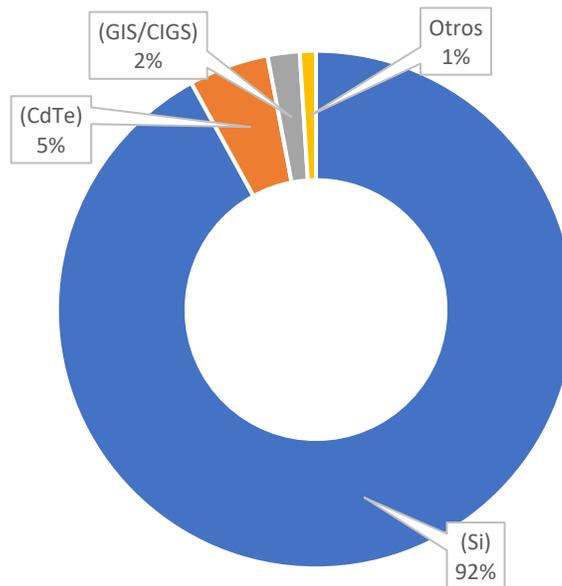
Dentro de los materiales semiconductores, el de mayor utilización para la confección de celdas fotovoltaicas es el silicio (Si), este metal se encuentra en la composición de la arena como óxido de silicio y ha sido utilizado por décadas para fabricación de distintos componentes electrónicos. Para el uso en celdas fotovoltaicas encontramos tres formas de silicio, el monocristalino, el policristalino y el amorfo.

- Mono-Si: Es un material de silicio caracterizado por estar formado de solo una estructura cristalina, lo que se logra controlando el crecimiento de silicio de tal forma que no se creen otras estructuras, dándole una forma cilíndrica sin bordes de grano y con una coloración característica metálica.
- Poli-Si: Es un material de silicio formado por más de una estructura cristalina en su interior, esto se obtiene al depositar el metal fundido en moldes sin controlar la forma en que se cristalizará, esto último hace que la coloración sea diferente al caso mono, ya que la refracción de la luz cambia dependiendo de las distintas estructuras cristalinas.
- A-Si: Es un material de silicio sin estructura cristalina, caracterizado por dar mayor flexibilidad para la forma de la célula.

Existen en el mercado otros tipos de materiales para la confección de celdas fotovoltaicas, como el telurio de cadmio (CdTe), indio, cobre, galio y selenio (GIS/CIGS) o celdas fotovoltaicas orgánicas. Estos materiales más el a-Si, son mayormente utilizados para paneles fotovoltaicos del tipo capa fina.

A 2014 en el mercado de paneles fotovoltaicos mundial, los basados en silicio contemplan el 92% de la tecnología implementada, como se puede ver en la Figura 6.

Figura 6: Presencia en el mercado mundial al año 2014 de las distintas tecnologías de paneles fotovoltaicos⁸



Los diferentes materiales de los que se encuentran basados los módulos fotovoltaicos tienen sus ventajas y desventajas, las que se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2: Ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de celdas solares.

	Ventajas	Desventajas
Monocristalino	Tiene mayor cantidad de Silicio por unidad de área, lo que aumenta la eficiencia final, esto por su estructura cristalina ordenada y compacta. Son ligeramente más resistentes a altas temperaturas que las policristalinas, pero este efecto no suele ser significativo.	El proceso de crear un monocristal es costoso y complicado, también se tiene que adecuar la forma cilíndrica cortando los bordes para maximizar el área efectiva de la celda, perdiendo silicio en el proceso.
Policristalino	Tienen costos de producción más baratos y siguen disminuyendo con el tiempo. El proceso de producción de los cristales es más sencillo y genera menos residuos de silicio	Tienen menos eficiencias por unidad de área, lo que implica en disponer de más terreno para alcanzar el mismo potencial que las monocristalinas. Tienen menor resistencia a las altas temperaturas que las monocristalinas,

⁸ Fuente: (Chowdhury, y otros, 2020)

		pero no es tan significativo en el resultado final
Capa fina	<p>Tienen la producción en serie más sencilla y con mucha perspectiva de disminuir los costos de esta.</p> <p>Tiene mayor tolerancia al calor que las células cristalinas.</p> <p>Pueden fabricarse celdas flexibles.</p>	<p>Tienen menor eficiencia por unidad de área que las policristalinas, por lo que no son útiles para uso residencial.</p> <p>A mayor área de paneles, mayor uso de otros componentes propios de la instalación de los paneles.</p> <p>Tienen menor vida útil que las células cristalinas.</p>

4.2 Caracterización de materiales

En base a los tipos de módulos descritos, y que existen en el mercado chileno (basados en silicio y capa fina CdTe) se procede a realizar un análisis de la materialidad de estos, con la cantidad de cada material que los componen. En esta línea, en la sección 5.2.1 del presente informe, se aborda las tecnologías que imperarán el mercado en el corto y mediano plazo, que justifica analizar módulos basados en silicio y del tipo capa fina, y no otras materialidades que aún no cuentan con desarrollos comerciales.

Asimismo, como parte de los módulos basados en silicio, también se analiza la materialidad de aquellos del tipo bifaciales, que, si bien a la fecha cuenta con un despliegue acotado en el país, se estima como el nuevo estándar de la industria para los próximos años, tal como se menciona en la sección 5.2.1.

4.2.1 Módulos basados en Silicio

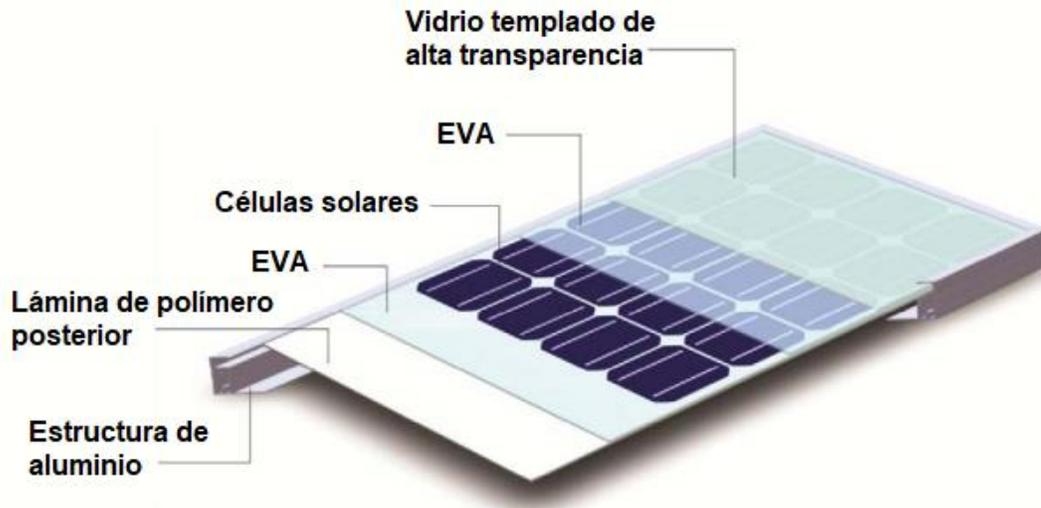
Tal como se mencionó anteriormente, los módulos fotovoltaicos basados en silicio son construidos por capas de distintos materiales, estas están ordenadas de tal forma que se pueda producir electricidad con la mejor optimización. En estos casos las células solares son fabricadas de forma separada del panel, para luego ser ensambladas junto a los demás componentes. Según este proceso de fabricación es que es posible identificar dos tipos de módulos basados en silicio, lo cual influye en su materialidad:

4.2.1.1 Módulos unificiales

Un módulo unifacial, es aquel que la recolección de energía proveniente de la luz solar, solamente se realiza por una cara del módulo. En este sentido, tal como se observa en la Figura 7, este cuenta

con distintas capas y en la última (que no apunta al sol) se tiene una lámina de polímero, que en muchas ocasiones es opaca.

Figura 7: Esquema de los componentes de un panel solar fotovoltaico unifacial basado en silicio⁹



Para este tipo de módulos unifaciales, el porcentaje en peso de cada uno de los componentes o capas puede variar dependiendo del fabricante. En la Tabla 3 se puede ver la composición típica de los materiales usados para construir estos paneles fotovoltaicos y su propósito en el funcionamiento, según antecedentes recopilados por estudios académicos en (Dias & Veit, Recycling Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, 2019).

Tabla 3: Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico unifacial basado en silicio, mono y policristalino¹⁰

<i>Material</i>	<i>Contenido en peso %</i>	<i>Propósito</i>
Silicio	2 - 3	Efecto fotovoltaico
Vidrio	69 - 75	Protección del módulo solar, permite paso de luz
Polímeros (EVA, Tedlar)	7	Protección del módulo solar, protege del calor
Cobre	0,6 - 1	Conductor de la corriente
Plata	0,006 - 0,06	Conductor de la corriente
Aluminio	10 - 20	Estructura del panel – dopaje “p” del Si – conductor
Boro	< 0,1	Dopaje “p” del Si

⁹ Fuente: (Pinho JT, 2014)

¹⁰ Fuente: (Dias, y otros, 2018)

Fósforo	< 0,1	Dopaje "n" del Si
Dióxido de estaño	< 0,1	Recubrimiento antirreflectante
Plomo	< 0,1	Recubrimiento del cobre
Estaño	< 0,1	Recubrimiento del cobre

En base a los porcentajes anteriores, si consideramos las características técnicas de algunos paneles disponibles en el mercado, se puede obtener un aproximado en peso real de los componentes (por módulo), tanto para silicio monocristalino como silicio policristalino.

Tabla 4: Contenido en peso aproximado de componentes, para distintos modelos de paneles cristalinos unifaciales¹¹

Material	Yingli Solar ¹²	Trina Solar ¹³
	Contenido [Kg]	
Vidrio	15,5 - 16,8	12,9 - 14,0
Polímeros (EVA, Tedlar)	1,6	1,3
Aluminio	2,2 - 4,5	1,9 - 3,7
	Contenido [g]	
Silicio	448,0 - 672 ,0	374,0 - 561,0
Cobre	134,4 - 224,0	112,2 - 187,0
Plata	1,3 - 13,4	1,1 - 11,2
Boro	< 22,4	< 18,7
Fósforo	< 22,4	< 18,7
Dióxido de estaño	< 22,4	< 18,7
Plomo	< 22,4	< 18,7
Estaño	< 22,4	< 18,7
TOTAL	20 - 24	16.5 – 19.7

Según lo anterior se observa que, en términos de masa, el módulo está compuesto en más de un 80%, de vidrio y aluminio (estructura soportante). No obstante, las celdas cuentan con otros elementos metálicos en su composición, como silicio y cobre, entre otros.

¹¹ Fuente: Fichas técnicas de módulos de los fabricantes Yingli Solar y Trina Solar

¹² Basado en módulo modelo YLM 72 CELL

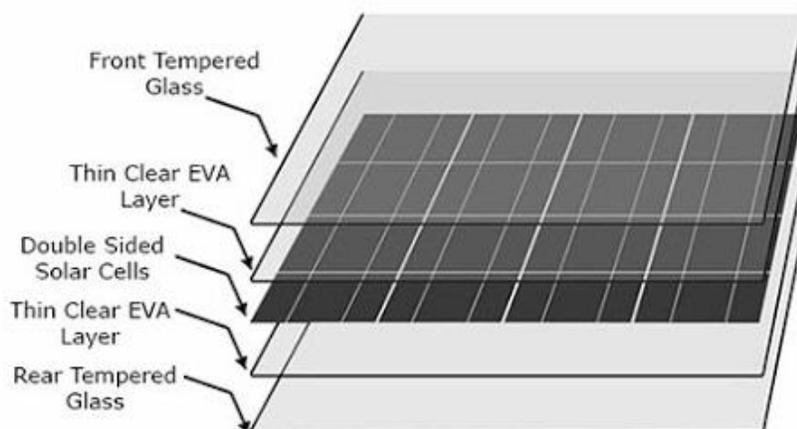
¹³ Basado en módulo modelo TSM-DE06H(II)

4.2.1.2 Módulos bifaciales

Los módulos bifaciales surgen como una respuesta de la industria solar fotovoltaica, a lograr aumentos en la eficiencia de los módulos y por ende contar con una mayor producción de energía eléctrica por unidad de superficie. Este tipo de módulos se encuentran disponibles en el mercado, y ya se encuentra operando la primera planta en Chile que incorpora esta tecnología (Proyecto Konda 3 MW)¹⁴. Se espera una expansión en el futuro de este tipo de módulos en el mercado, conforme sus beneficios comiencen a compensar su alza en el costo respectivo.

Este tipo de módulos permiten mejorar la eficiencia entre un 10% a 30%, dependiendo de la superficie donde son instalados, en comparación con los módulos unificiales (Janssen, Van Aken, Carr, & Mewe, 2015), lo que se refleja en una mayor captura de energía por unidad de área de este. Asimismo, dado que son módulos que cuentan con “dos caras” cuentan con una materialidad diferente a la de los módulos unificiales, según como se muestra en la composición por capas de la figura.

Figura 8: Esquema de los componentes de un panel solar fotovoltaico bifacial basado en silicio¹⁵



En cuanto a los componentes de los módulos fotovoltaicos bifaciales, en el mercado existen diversos fabricantes que los comercializan, pero cuentan con una materialidad definida y documentada en la literatura.

¹⁴ Fuente: https://acera.cl/wp-content/uploads/2020/04/Parque-Solar-Konda-para-informe-de-prensa.pdf?mc_cid=b8c76cc87e&mc_eid=89e31b35a1

¹⁵ Fuente: <http://www.discountsolarsupply.com/Products/bifacial-300-watt-ev-solar-charging-systems.htm>

Tabla 5: Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico bifacial basado en silicio, mono y policristalino¹⁶

<i>Material</i>	<i>Contenido en peso %</i>	<i>Propósito</i>
<i>Silicio</i>	1,6	Efecto fotovoltaico
<i>Vidrio</i>	86,8	Protección del módulo solar, permite paso de luz
<i>Polímeros (EVA, Tedlar)</i>	2,9	Protección del módulo solar, protege del calor
<i>Cobre</i>	0,5	Conductor de la corriente
<i>Plata</i>	< 0,06	Conductor de la corriente
<i>Aluminio</i>	7,9	Estructura del panel – dopaje “p” del Si – conductor
<i>Boro</i>	< 0,1	Dopaje “p” del Si
<i>Fósforo</i>	< 0,1	Dopaje “n” del Si
<i>Dióxido de estaño</i>	< 0,1	Recubrimiento antirreflectante
<i>Plomo</i>	< 0,1	Recubrimiento del cobre
<i>Estaño</i>	< 0,1	Recubrimiento del cobre

Asimismo, en base a tal estimación de participación en peso, se obtuvo la masa de cada componente a partir de un módulo bifacial de la empresa Yingli Solar, según lo que se describe en la siguiente tabla:

Tabla 6: Contenido en peso aproximado de componentes, para paneles cristalinos bifaciales mono y policristalinos¹⁷

<i>Material</i>	<i>Yingli Solar</i>
	Contenido [Kg]
<i>Vidrio</i>	24.2
<i>Polímeros (EVA, Tedlar)</i>	0.8
<i>Aluminio</i>	2.2
	Contenido [g]
<i>Silicio</i>	448.0
<i>Cobre</i>	134.4
<i>Plata</i>	1.3
<i>Boro</i>	22.4
<i>Fósforo</i>	22.4
<i>Dióxido de estaño</i>	22.4
<i>Plomo</i>	22.4
<i>Estaño</i>	22.4

¹⁶ Fuente: Estimación propia en base a módulo PANDA CF de Yingli Solar y (Dias & Veit, Recycling Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, 2019)

¹⁷ Fuente: Estimación propia en base a módulo PANDA CF de Yingli Solar.

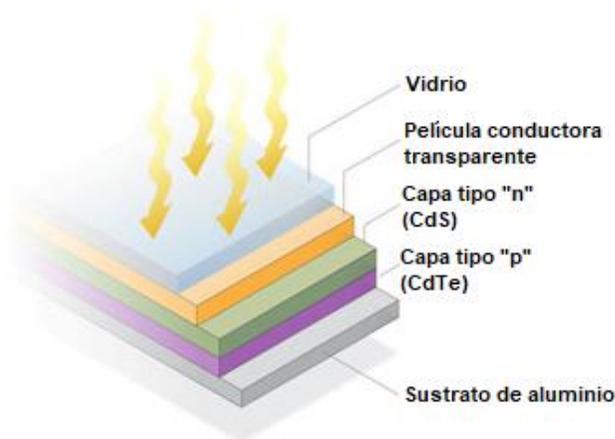
Según lo anterior se observa que el módulo bifacial cuenta con una materialidad similar a la del módulo cristalino de una sola cara, con la particularidad de que poseen dos capas de vidrio y no poseen la tapa posterior de polímero, poseyendo un 50% más de vidrio que los anteriores. Asimismo, las celdas cuentan con las mismas características de materiales que las de los módulos cristalinos unificales.

4.2.2 Módulos de capa fina

Los módulos solares de capa fina funcionan de la misma forma que los basados en silicio, se usan materiales semiconductores tipo "n" y "p" para la generación de electricidad y otros materiales para el recubrimiento, protección y conducción de la corriente, sin embargo, las células solares no son partes construidas de forma separada al módulo, sino, que son parte íntegra del panel.

El proceso usado para formar las capas de material semiconductor es la deposición de nanopartículas sobre un sustrato, creando una capa que, dependiendo del fabricante, puede ser desde los nanómetros hasta los micrómetros de espesor. En la Figura 9 se puede observar la distribución de las capas de los distintos materiales de un módulo de capa fina compuesto por Teluro de Cadmio (CdTe) y Sulfuro de Cadmio.

Figura 9: Estructura de un panel solar de capa fina¹⁸



En estos paneles la composición de los distintos materiales usados es relativamente similar a los basados en silicio, ambos tienen gran contenido en vidrio y aluminio, pero difieren en gran medida en la cantidad de material de las células fotovoltaicas, llegando en los paneles de capa fina a ser

¹⁸ Fuente: (U.S. Department of Energy, 2020)

cerca del 0.15% de material usado para este fin. En términos prácticos, en un panel de 15 [kg] puede haber aproximadamente 23 [g] de material semiconductor.

La planta fotovoltaica más conocida en que se implementa este tipo de tecnología es la Topaz Solar Farm en Estados Unidos, con 550 [MW] instalados. En este proyecto se usaron 9 millones de módulos solares de telurio de cadmio (CdTe) fabricados por First Solar. Es en base a este fabricante, es que se realizó una estimación de la composición de materiales de estos. Cabe señalar que, tal como mencionó anteriormente, la empresa First Solar también cuenta con un proyecto en Chile con la tecnología capa fina, Luz del Norte (140 MW).

Tabla 7: Contenido en peso aproximado de componentes, para paneles capa fina CdTe¹⁹

<i>Material</i>	<i>Estimación</i>
	Contenido [Kg]
<i>Vidrio</i>	32
<i>Polímeros (EVA, Tedlar)</i>	S/I
<i>Aluminio</i>	3.0
	Contenido [g]
<i>Cadmio</i>	1.68
<i>Telurio</i>	39.06
<i>Cobre</i>	S/I
<i>Plata</i>	S/I
<i>Boro</i>	S/I
<i>Plomo</i>	S/I
<i>Estaño</i>	S/I

Tal como se indica en la tabla anterior, la composición de los módulos del tipo capa fina si bien se encuentra detallada en la literatura para los elementos Cadmio y Telurio, además de la utilización de vidrio y aluminio, se desconoce la participación de otros elementos en estos. Asimismo, cabe mencionar que, si bien un módulo de capa fina tiene un mayor peso que en uno en base a silicio, entrega una menor potencia.

¹⁹ Fuente: Estimación propia en base a módulo Serie 6 de First Solar.

4.3 Caracterización de módulos instalados en Chile

En la sección 3.3 se detalló cuál es la línea base de módulos instalados en Chile, contando con una caracterización de que tecnologías son las predominantes en el país y la cantidad de ellos. En vista de esto, se procedió a obtener una identificación de los componentes de módulos fotovoltaicos presentes en el país, en cuanto a su participación en peso. Esta estimación se obtuvo en base a lo descrito en el capítulo anterior de componentes de materiales de las respectivas tecnologías de módulos FV instalados en Chile a la fecha.

A continuación, se muestra el resumen del levantamiento de línea base, en cuanto a la cantidad de módulos, su capacidad instalada, y luego el total de materiales desagregados de estos a marzo del año 2020.

Tabla 8: Resumen del levantamiento de línea base de módulos fotovoltaicos instalados en Chile.²⁰

	<i>Tecnología</i>		
	Monocristalino Unifacial	Policristalino Unifacial	Capa Fina CdTe
<i>Capacidad Instalada (MW)</i>	33	2,724	239
<i>Número de módulos</i>	106,557	9,263,021	3,138,720

Tabla 9: Estimación de materiales empleados en los módulos actualmente instalados en Chile a marzo de 2020²¹

<i>Material</i>	<i>Estimación total país a marzo 2020 [toneladas]</i>	
	Cristalino Unifacial²²	Capa Fina CdTe
<i>Vidrio</i>	145,228	100,439
<i>Polímeros (EVA, Tedlar)</i>	14,991	S/I
<i>Aluminio</i>	20,613	9,416
<i>Silicio</i>	4,198	S/I
<i>Cobre</i>	1,259	S/I
<i>Plata</i>	12	S/I
<i>Boro</i>	210	S/I
<i>Fósforo</i>	210	S/I
<i>Dióxido de estaño</i>	210	S/I

²⁰ Fuente: Elaboración propia.

²¹ Fuente: Elaboración propia.

²² Se habla de módulos cristalinos como la suma de los módulos monocristalinos y policristalinos.

<i>Plomo</i>	210	S/I
<i>Estaño</i>	210	S/I
<i>Cadmio</i>	0	5
<i>Telurio</i>	0	123

Según lo indicado anteriormente, a marzo de 2020 existen casi 250,000 toneladas de vidrio correspondientes a los módulos fotovoltaicos instalados en el país. Asimismo, se cuenta con cerca de 30,000 toneladas de aluminio, principalmente asociada a los marcos de los módulos fotovoltaicos instalados.

En cuanto a componentes específicas de las tecnologías cristalinas se tiene que existen cerca de 4,000 toneladas de silicio, entre otros elementos con una menor participación como boro, fósforo, plata, plomo, entre otros. Por otra parte, cabe resaltar que como componentes de los módulos capa fina instalados en el país a la fecha, se estiman que existen cerca de 5 toneladas de cadmio y 123 de telurio.

4.4 Caracterización y cuantificación de materiales reutilizables, reciclables, no reciclables y descartables

En este apartado se caracterizan y cuantifican los materiales reutilizables, reciclables, no reciclables y descartables de módulos fotovoltaicos y se realiza una primera aproximación de su proyección al 2050. La caracterización de los materiales se base en el punto 4.2 donde se describe los materiales que componen los módulos actualmente instalados en Chile.

Para la cuantificación de materiales reutilizables, reciclables, no reciclables y descartables se ha elaborado una aproximación a través de modulación debido a que existen factores no cuantificables a menos que se asuman algunos supuestos en el desarrollo de tecnología.

4.4.1 Introducción a las alternativas de reutilización y reciclaje de módulos FV

La Ley marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje (Ley N°20.920), busca como principal objetivo es disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el Medio Ambiente, es por ello que con esta ley se espera lograr:

1. Disminuir la eliminación de residuos.
2. Disminuir el impacto ambiental asociado a la extracción de materias primas.
3. Disminuir el uso de recursos naturales.

4. Aumentar la vida útil de los productos.
5. Prevenir la generación de residuos.
6. Mejorar los productos a través del ecodiseño

Para lo cual la ley establece la jerarquía en el manejo de residuos, que se esquematiza en la Figura 10:

Figura 10: Pirámide de residuos, MMA 2016



En base a esta pirámide, y en conformidad con las definiciones anteriores de este estudio, se han identificado los materiales que pueden ser aptos para los dos procesos definidos en la Ley REP como:

- **Prevención:** Conjunto de medidas adoptadas en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o producto, para reducir la cantidad de residuos.
- **Preparación para la reutilización:** Acción de revisión, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos desechados se acondicionan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa.
- **Reutilización:** Acción mediante la cual productos o componentes de productos desechados se utilizan de nuevo, sin involucrar un proceso productivo.
- **Reciclaje:** Empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, incluyendo el co-procesamiento (y compostaje, pero excluyendo la valorización energética).²³

²³ Definiciones según: Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Ley N°20.920

Este esquema jerárquico será parte del análisis del fin de vida de los módulos fotovoltaicos, por lo que además de evaluar los escenarios y alternativas de reciclaje, se analizarán las tendencias globales en cuanto a prevención, reutilización y valorización energética.

4.4.2 Fin de vida útil de módulos fotovoltaicos

La definición de fin de vida útil se adapta a la realidad del producto. En este estudio es el momento en que el producto ya no satisface al comprador inicial o al primer usuario/dueño en el primer lugar de instalación del panel fotovoltaico y entra a una fase de fin de vida útil, cual involucra varios escenarios que se definen más adelante.

Esta definición adoptada en este estudio se elige porque permite la reutilización además de reciclar como posibles estrategias de fin de vida.

Otras definiciones comienzan desde el último usuario, pero no incluyen estrategias de final de vida útil altamente eficientes como la reutilización y el servicio como estrategias para mejorar el rendimiento del producto al final de su vida útil. Otros definen el final de la vida útil como el punto en el que el producto ya no realiza las funciones previstas debido a fallas o desgaste, cual escenario también se involucra en el estudio bajo los posibles escenarios de fin de vida útil²⁴.

El fin de vida útil no es fácil de determinar en los módulos fotovoltaicos por distintas razones que serán profundizadas en el siguiente informe que incorpora el benchmark. No obstante lo anterior, la complejidad se da entre otras razones porque la masificación de esta tecnología es reciente y recién algunas primeras instalaciones en Alemania están llegando al límite de contratos y garantías que promedian de 20 a 25 años. En segundo lugar, la garantía de los equipos no determina su fin de vida, sino un límite de eficiencia de aprox. 85% por lo que los módulos fotovoltaicos pueden seguir funcionando con menor eficiencia y una mayor tasa de fallas. Por último, pueden existir otras variables ajenas a la funcionalidad de los módulos que determinen su fin de vida, como aspectos contractuales o económicos.

Más allá de qué determine el fin de vida de los paneles fotovoltaicos, los residuos que se generen pueden tener distintas vías de tratamiento:

Tabla 10: Alternativas de Fin de Vida de Módulos Fotovoltaicos, tabla preliminar, elaboración propia

Estado del módulo (que ocasiona el fin de vida útil)	Vía de tratamiento (posible manejo)
El módulo deja de funcionar debido a fallas menores reparables	Acondicionamiento a través de reparación o cambio de partes del módulo para su reutilización

²⁴ Fuente: (Rose, 2001)

El módulo ha llegado al fin de su garantía o vida útil predeterminado por el productor (sin dejar de funcionar)	El módulo sigue en su lugar instalado sin cambios (y sin garantía) (sigue con VU vigente)
	El módulo se desinstala para su reutilización en un mercado secundario (sigue con VU vigente)
El módulo ha bajado en eficiencia (degradado) de forma leve y todavía cuenta con una eficiencia útil	El módulo sigue en su lugar instalado sin cambios (y sin garantía) (sigue su VU)
	El módulo se desinstala para su reutilización en un mercado secundario (sigue con VU vigente)
El módulo ha bajado en eficiencia (degradado) de forma que no es más útil	Desinstalación y Reciclaje
El módulo deja de funcionar por fallas mayores que no son reparables	Desinstalación y Reciclaje

Fallas de módulos:

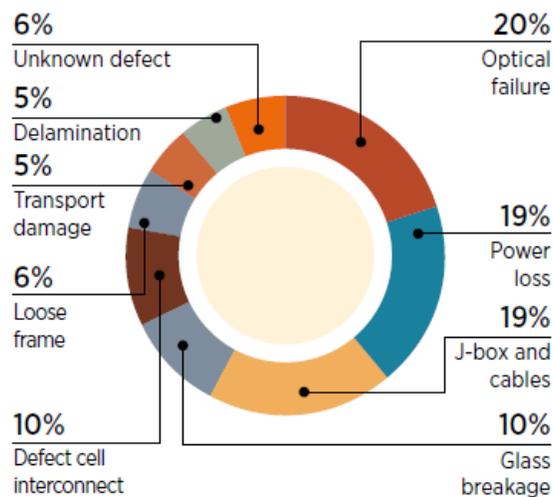
Existen distintos motivos por lo que los módulos FV fallan y que llevan a su reemplazo dado a que pueden afectar toda la serie o string del proyecto.

Este reemplazo genera una fuente menor pero constante de paneles para reciclaje.

Sin embargo, existen proyectos al nivel internacional para reparar o reacondicionar los módulos para su reinstalación en el mismo proyecto o en otros proyectos. (SecondSol, Alemania)

Las razones mayores tasas de fallas tienen relación con fallas ópticas, pérdidas de eficiencia y problemas de cableado.

Figura 11. Tasas de fallas de acuerdo a reclamos de clientes, IRENA 2016.



De acuerdo a IRENA 2016 la proporción de fallas en un proyecto son las siguientes:

- 0.5% de paneles fotovoltaicos (por capacidad instalada en MW) se supone que llega al final de su vida debido a daños durante las fases de transporte e instalación;
- 0.5% de los paneles fotovoltaicos se convertirán en residuos dentro de dos primeros años debido a una mala instalación;
- 2% se convertirá en desperdicio después de diez años;
- 4% lo hará después 15 años debido a fallas técnicas.

La variable de fallas en los paneles será integrada en las modelaciones de distintos escenarios.

Degradación:

Tal como se mencionó previamente, los paneles solares FV han mejorado su construcción y composición en los últimos 40 años logrando un estándar de duración equivalente a la eficiencia promedio de aprox. 85% al cabo de 25 años, datos que, por ejemplo, se usa hoy día en los contratos de fabricantes para definir una garantía de eficiencia de la planta de módulos policristalinos. Sin embargo, los paneles frecuentemente producen energía mucho después de que expire su garantía.

La tasa de degradación es la tasa a la que los paneles solares pierden eficiencia con el tiempo. Un panel con una tasa de degradación del 1% anual será 10% menos eficiente después de 10 años.

Según un estudio de 2012 realizado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable²⁵, la tasa de degradación promedio para paneles fotovoltaicos es de 0.5% a 0.8% por año.

De hecho, el 78% de los paneles policristalinos tienen una tasa de degradación menor al 1% anual, para los paneles de capa fina se considera una degradación mayor a 1% anual (NREL, 2012). Eso significa que después de 25 años de uso, aproximadamente 4 de cada 5 paneles solares siguen funcionando con una eficiencia del 75% o mejor.

4.4.3 Reutilización

La Reutilización tiene como objetivo alargar la vida útil de un producto en varias formas, antes que se los den de baja por completo y entren a reciclaje, valorización energética o eliminación. Según la Ley para la economía circular de Alemania (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017)²⁶, la reutilización se define como "cualquier proceso en el que los productos o componentes que no son residuos se reutilizan para el mismo propósito para el que fueron destinados originalmente". La idea es ahorrar esfuerzo y material mediante el uso de un elemento que ya no es necesario en un punto y, por lo tanto, vuelve a estar disponible en otro punto. Este procedimiento ahorra la destrucción (también desarmado o eliminación) de lo que ya no es necesario y al mismo tiempo permite su sobre vida en el mismo u otro proyecto.

²⁵ Fuente: (NREL, 2012)

²⁶ KrWG (idF. v. 24. Februar 2012) §3, (21)

Bajo el marco de la economía circular, alargar la vía útil permite (Carlos Montalvo, 2016):

- Aprovechar mejor la energía primaria usada para producir el producto (medible por distintos indicadores como p.ej. la huella de carbono)
- Ahorrar energía para el cambio/valorización del producto que significa un anticipado fin de vida útil (igualmente medible por indicadores como la huella de carbono)
- Resguardar recursos naturales en un estatus quo para esperar nueva tecnología para una recuperación eficiente en un futuro (calculable como inversión en recursos naturales)

Líneas de reutilización:

- **Proyectos de reparación:** y reutilización de los distintos productores
- **Reventa en línea:** Proyectos de reparación, reventa o reúso de paneles dados de baja que entran a un mercado de segunda mano
- **Proyectos de caridad:** los paneles pueden donarse para su uso en proyectos sociales

4.4.4 Reciclaje

En el punto 4.2 se han caracterizado los materiales de la composición de cada tecnología. De estos materiales teóricamente todos están reciclables, suponiendo que existen líneas de reciclaje para cada uno.

Definición de Reciclabilidad:

La Reciclabilidad es la idoneidad de un producto para sustituirlos materiales de un producto nuevo, con posterioridad a su uso. En la práctica, el residuo originado tras el uso del producto se transforma en materia prima para el mismo o nuevos productos.

Los paneles FV están compuestos de vidrio, cobre, materiales semiconductores, aluminio, y otros materiales dependiendo del tipo de panel. La mayor parte de estos componentes son posibles de recuperar a través del reciclaje. Sin embargo, los porcentajes recuperables a través del reciclaje dependerán de las tecnologías y vías de separación (y de su costo efectividad), por lo que es importante tomar estos factores en consideración.

Es importante señalar que el fin de vida de los paneles fotovoltaicos no es considerado un residuo peligroso (IRENA, 2016). Por ende, el reciclaje de sus componentes no requiere de una logística o separación especial. Como se puede ver en Figura 12, prácticamente todos los materiales que componen los módulos fotovoltaicos son reciclables en alguna proporción.

Un componente que llama la atención por no ser reciclable es la proporción de plástico. Los polímeros encapsulantes de las láminas posteriores que sellan los paneles corresponden a etilvinilacetato (EVA), las que no son reciclables hoy ya que no se pueden disolver o extruir para reciclaje sin descomponer sus elementos. El otro polímero plástico no reciclable son los conductores de salida de los paneles ya que contienen aditivos ignífugos y de protección UV que impiden su reciclaje.

Para el caso de los componentes no reciclables, en específico los plásticos, la alternativa de valorización analizada en Japón, como alternativa al reciclaje es la valorización energética. Esa alternativa en Chile dependerá de si se considera esa alternativa de valorización en el Reglamento del Producto Prioritario Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE).

Los procesos de reciclaje que se han desarrollado para la recuperación de estos materiales se dividen en dos escenarios que dan cuenta de distintos grados de desarrollo en cuanto al reciclaje de los distintos materiales:

- Bulk Recycling (reciclaje de componentes masivos): recuperación de los materiales de mayor volumen y peso más fáciles de separar como vidrio y aluminio, dejando algunos materiales de menor volumen de difícil separación como descarte no aprovechable.
- High Value Recycling (reciclamiento de alto valor): recuperación de la mayoría de los materiales usados en los paneles, incluyendo los elementos que se encuentran en proporciones menores.

En este sentido, existe evidencia a nivel mundial en cuanto a los porcentajes de reciclabilidad que tienen los módulos fotovoltaicos de las tecnologías consideradas en el presente estudio. Esto se puede ver en la siguiente figura, en donde elementos como el aluminio contenido en los marcos de los módulos tienen un porcentaje de reciclabilidad del 100% versus elementos como el telurio presente en los módulos de capa fina analizados, en donde este alcanza un 80%.

Figura 12: Antecedentes de reciclabilidad de módulos por tecnología y antecedentes de ciclo de vida.²⁷

Material composition	x-Si ² (%)	CdTe (%)	CIGS/CIS (%)	Recycling rates (%)	
Aluminium (Al)	17.5	-	-	100	
Cadmium (Cd)	-	0.08	-	98	
Copper (Cu)	1.0	0.03	0.01	78	
Gallium (Ga)	-	-	0.01	99	
Indium (In)	-	-	0.01	75	
Molybdenum (Mo)	-	-	0.12	99	
Plastic	12.8	3.00	3.00	-	
Selenium (Se)	-	-	0.01	80	
Silicon (Si)	2.9	-	-	85	
Tin (Sn)	-	0.02	-	99	
Tellurium (Te)	-	0.07	-	80	
Glass	65.8	96.80	96.80	97	
Zinc (Zn)	-	-	0.04	90	
	Mono-Si (Range)	Multi-Si (Range)	Thin film a-Si	CdTe	CIGS/CIS
LIFE CYCLE ENERGY REQUIREMENT (MJ/m²)	2860-5253	2699-5150	710-1990	790-1803	1069-1684
EPBT (years)	1.7-2.7	1.5-2.6	1.8-3.5	0.75-2.1	1.45-2.2
GHG emission rate (g CO₂ eq/kWh)	29-45	23-44	18-50	14-35	10.5-46

²⁷ Fuente: (Sica, Malandrino, Supino, Testa, & Lucchetti, 2018)

5 Proyección de módulos al 2050

A la fecha, tal como se indicó anteriormente, existen cerca de 12.5 millones de módulos fotovoltaicos instalados en el país, en donde se les puede agrupar entre los basados en silicio y los del tipo capa fina (CdTe). Es vista de ello, es de consenso en el sector energético que en los próximos años que este número siga creciendo, alcanzando una participación considerable en la matriz de generación eléctrica.

Para cuantificar tal crecimiento, es que se elaboraron diversas proyecciones del parque de módulos fotovoltaicos en el país al año 2050, lo anterior en base a escenarios de futuro elaborados por el Ministerio de Energía como parte de su quehacer.

5.1 Escenarios de proyección

Una de las últimas modificaciones incorporadas a Ley General de Servicios Eléctricos, tiene relación con que el Ministerio de Energía debe llevar a cabo un proceso de Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) cada cuatro años, con la finalidad de establecer escenarios de largo plazo de desarrollo del sector eléctrico. Asimismo, el Ministerio de Energía debe elaborar actualizaciones anuales de tales proyecciones, en base a los escenarios determinados en el proceso respectivo.

Actualmente, se encuentran vigentes los escenarios del primer proceso de Planificación Energética de Largo Plazo para el período 2018-2022²⁸. Estos escenarios buscan representar un abanico de futuros posible de desarrollo del sector mediante la variación y diferenciación de diversos factores clave, según lo que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11: Escenarios del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo.²⁹

Factores	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E
1. Disposición social para proyectos (*)	+ Costo y con carbón CCS	Libre	+ Costo y con carbón CCS	+ Costo	+ Costo
(Intensidad de retiro de centrales a carbón)	(Alta)	(Baja)	(Alta)	(Media)	(Media)
2. Demanda energética	Baja	Alta	Media	Baja	Alta
3. Cambio tecnológico en almacenamiento en baterías	Alto	Bajo	Medio	Medio	Alto
4. Costos de externalidades ambientales (**)	Actual	+Alto	Actual	Actual	+Alto
5. Costos de inversión de tecnologías renovables	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Bajo
6. Precio de combustibles fósiles	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Alto

(*) ++Costo, +Costo y Libre representan sobrecostos altos, bajos y nulos a proyectos de generación en algunas zonas del sur del país, así como intensidad de retiro de carbón alta, media y baja, respectivamente.

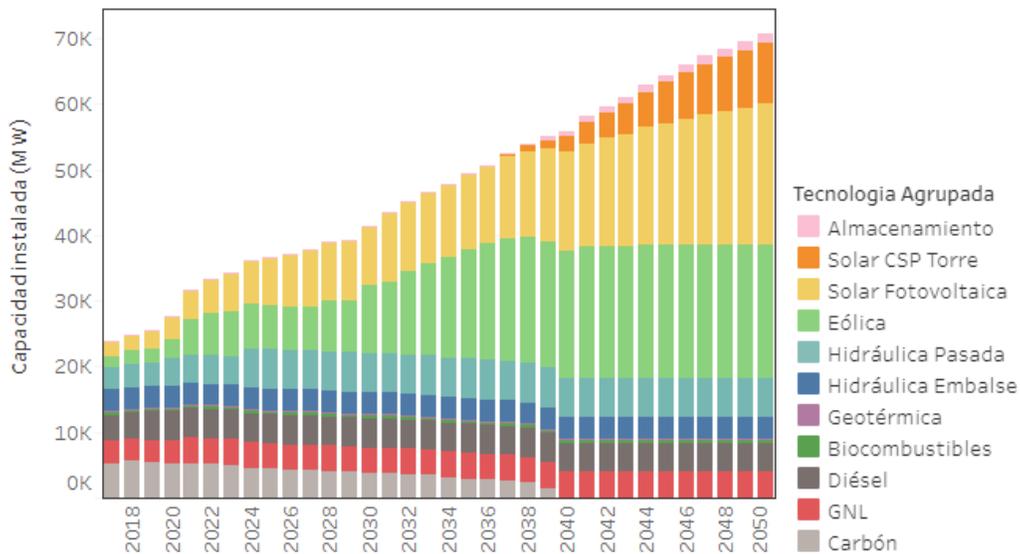
²⁸ Decreto Exento N°92 / 2018 del Ministerio de Energía.

²⁹ Fuente: (Ministerio de Energía, 2020)

Dado el carácter del proceso de la PELP este considera como insumos y resultados diversas proyecciones de variables del sector energético, tales como demanda energética, costos de tecnologías, precios de combustibles, entre otros. En este sentido, para el objetivo del presente estudio resulta de utilidad considerar la proyección de capacidad instalada de generación eléctrica y la de capacidad instalada de generación distribuida residencial y comercial (“netbilling”). Ejemplos de estas proyecciones en el último informe de actualización de este proceso (2019) se muestran en las siguientes figuras.

Figura 13: Capacidad instalada de generación en el Escenario B de la PELP³⁰

Evolución capacidad instalada

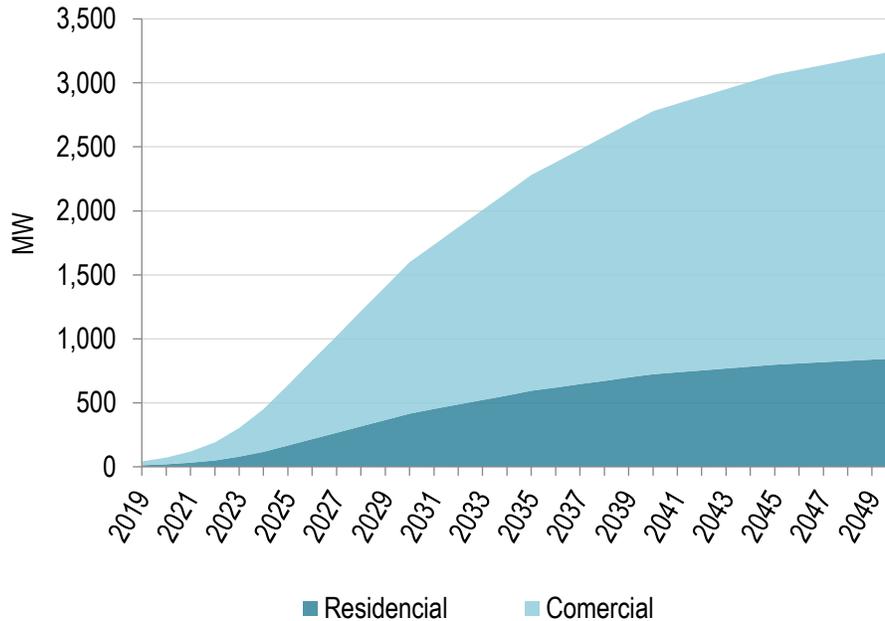


Como es posible observar, las proyecciones de capacidad instalada de generación eléctrica se encuentran desagregadas por tecnología, siendo el caso de solar fotovoltaica una de ellas. No obstante, cabe mencionar que estas proyecciones no se encuentran desagregadas por el tipo de central que es instalada bajo la agrupación planteada en el presente estudio (Gran Escala, PMG y PMGD), por lo que la proyección se realizará agrupando estas tres tipologías.

Asimismo, del proceso de la PELP se obtiene la proyección de capacidad instalada solar fotovoltaica para instalaciones del tipo “netbilling”, según lo que se muestra en la siguiente figura. En donde se estima que al año 2050 se tendrán más de 3 [GW] en este tipo de instalaciones.

³⁰ Fuente: (Ministerio de Energía, 2020)

Figura 14: Proyección de capacidad instalada solar fotovoltaica del tipo distribuida (netbilling).



Es en base a tales proyecciones que se estima una proyección de los módulos fotovoltaicos en el país, tal como se da cuenta en la sección 5.3. Previo a aquello, se realiza una revisión cualitativa de cuáles son las principales tendencias y supuestos que se abordan para llevar a cabo una estimación de módulos al año 2050.

5.2 Supuestos tecnológicos y materiales

Según lo descrito previamente, las proyecciones realizadas en el marco del proceso de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía no cuentan con una desagregación por la tecnología del módulo fotovoltaico que se provee a futuro. No obstante, es posible tomar ciertos supuestos con tal de obtener las grandes tendencias en el desarrollo de los módulos fotovoltaicos en el país. Cabe señalar que tales supuestos pueden ser modificados en las planillas de datos entregadas por el equipo consultor, con lo que son flexibles y transparentes para los cálculos.

Dado lo anterior, a continuación, en las siguientes secciones, se abordan en detalle los principales supuestos asumidos en las proyecciones de tecnologías de módulos fotovoltaicos, con énfasis en tres principales aspectos:

- Materialidad del módulo que se instalará en los próximos años en el país, y que tecnologías tienen poca probabilidad o certeza de emplearse.
- Eficiencia del módulo que se instalará en los próximos años, y como esta puede cambiar en el futuro.

- Tecnología del módulo que se instalará en los próximos años, en cuanto a que esta se encuentra en constante evolución en el mercado fotovoltaico a nivel mundial.

5.2.1 Materialidad del módulo

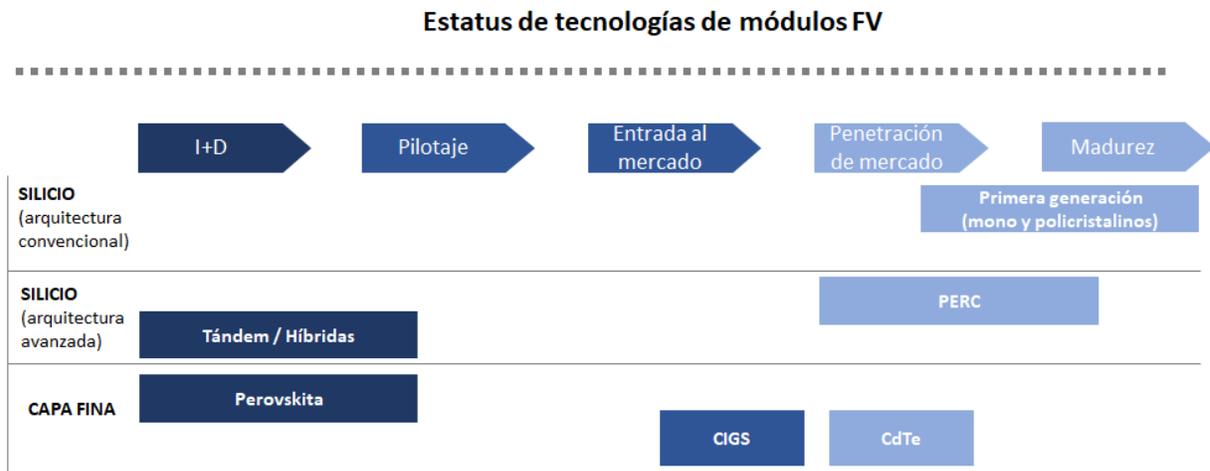
Actualmente, tal como se ha venido detallando en el presente informe, en el mercado chileno y mundial predominan los módulos fotovoltaicos basados en silicio. Asimismo, dentro de este grupo los predominantes son los del tipo policristalinos.

Para el corto y mediano plazo, diversos fabricantes entrevistados para el desarrollo de etapas posteriores del estudio³¹, mencionan que la tecnología solar fotovoltaica seguirá estando dominada por paneles basados en silicio, debido a su alta disponibilidad como material, bajo costo y las constantes mejoras en eficiencia que se están llevando a cabo. Como soporte de esto, en variados reportes de organismos internacionales se establece que el material predominante para la fabricación de los módulos fotovoltaicos seguirá siendo el silicio, debido a la madurez tecnológica que ha alcanzado.

El hecho anterior se puede ver en el siguiente esquema, en donde nuevos materiales como la Perovskita, que promete traer aumentos considerables en la eficiencia de los módulos del tipo capa fina, aún se encuentran en etapas muy tempranas de investigación y desarrollo. Particularmente, este tipo de módulos solo han sido probados en laboratorio y en pequeños arreglos, asimismo aún deben superar grandes dificultades en cuanto a su durabilidad (IRENA, 2019). Por último, cabe mencionar que gran parte de la industria ve este material como una muy buena oportunidad de masificar aún más la generación eléctrica mediante energía solar, debido a que este tipo de módulos tendrían un costo mucho más bajo que las celdas actuales.

³¹ Si bien las entrevistas forman parte de una etapa posterior del estudio, se decidió anticiparlas con la finalidad de obtener una visión de desarrollo tecnológico del sector. Las pautas de entrevistas se pueden encontrar en Anexos.

Figura 15: Estatus comercial de las principales tecnologías de módulos fotovoltaicos al 2019, por material utilizado.³²



Otros módulos fotovoltaicos que se han utilizado en el mundo, y que cuentan con una participación menor en proyectos instalados a nivel mundial (ver Figura 6), corresponden a aquellos compuestos por Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), los cuales son del tipo capa fina. Estos, han alcanzado una eficiencia similar a los módulos en base a silicio, pero presentan grandes complejidades en cuanto a la disponibilidad de algunos de sus materiales y a los procesos de fabricación que involucra (IRENA, 2019). En este sentido, tampoco se ve como una tecnología que fuese a tener una fuerte expansión en el mercado mundial.

Dado estos argumentos, es que se asume como supuesto base que los módulos que se instalen a futuro en el país serán basados en silicio y particularmente del tipo policristalinos, dadas las ventajas mencionadas por los fabricantes entrevistados.

5.2.2 Eficiencia del módulo

Los módulos fotovoltaicos han tenido una constante mejora en su eficiencia en los últimos años, en donde, independiente del material de su fabricación, han alcanzado niveles por sobre el 15%. Algunos de ellos, tal como los módulos basados en silicio, han logrado saltar de niveles de eficiencia de entre un 13% a 15% en el año 2006 a un rango entre 17% a 18% en la actualidad (IRENA, 2019).

Este crecimiento en la eficiencia de los módulos se espera que siga creciendo en los próximos años debido a la introducción de arquitecturas avanzadas en la composición de las celdas fotovoltaicas, como lo son las del tipo PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)³³. Estas, según diferentes reportes

³² Fuente: Traducción del equipo consultor, en base a (IRENA, 2019)

³³ La tecnología PERC, corresponde a la adición de una capa adicional en el módulo fotovoltaico. Esta corresponde a un material dieléctrico pasivo, con agujeros, que se incorpora a continuación de la celda

y opiniones de fabricantes, se convertirán en el estándar de la industria en el mediano plazo (Solarity, 2020) y permitirán que los módulos basados en silicio alcancen eficiencias cercanas al 20%.

5.2.3 Tecnología del módulo

Por último, otro supuesto que debe ser considerado en las proyecciones, corresponde a la tecnología del tipo bifacial, la cual tal como fue descrita en el capítulo 4.2.1, presenta una mayor captura de la energía proveniente del sol y está asociada al salto en términos de la potencia que es capaz de entregar un módulo fotovoltaico señalado anteriormente.

La innovación introducida por los módulos bifaciales no es excluyente de las mejoras descritas anteriormente como la de la arquitectura PERC, sino que es complementaria y actúa en otro campo de acción diferente. Los módulos bifaciales permiten una mayor captura de los rayos solares, permitiendo recopilarlos por el reverso del módulo además del frente. Según diversos reportes internacionales (por ej. (IRENA, 2019)), actualmente este tipo de módulos son mayoritariamente fabricados en China y están comenzando a alcanzar una fase de madurez tecnológica.

Los módulos fotovoltaicos bifaciales, han venido siendo desarrollados por décadas y su despliegue en el mercado ha estado dificultado por su alto costo y elevado peso. No obstante, diversas mejoras en su proceso de fabricación estiman que tendrá un gran crecimiento en el mediano y largo plazo, pasando de un 5% de participación en el mercado mundial de módulos fotovoltaicos en el año 2018 a un 40% al finalizar la presente década (VDMA, 2019).

Las mejoras en eficiencia que traerá la arquitectura PERC y la configuración bifacial de estos, entre otros desarrollos, producirá que los módulos estándar pasen de los 300 W que se tiene en la actualidad³⁴ a cerca de 500 [W] según lo mencionado por distintos fabricantes entrevistados en el marco del presente estudio. En vista de esto, es que se tomará como sensibilización en las proyecciones, que cada módulo fotovoltaico instalado a partir del año 2025 tendrá una capacidad de 500 [W].

5.3 Proyección de módulos FV por tipo

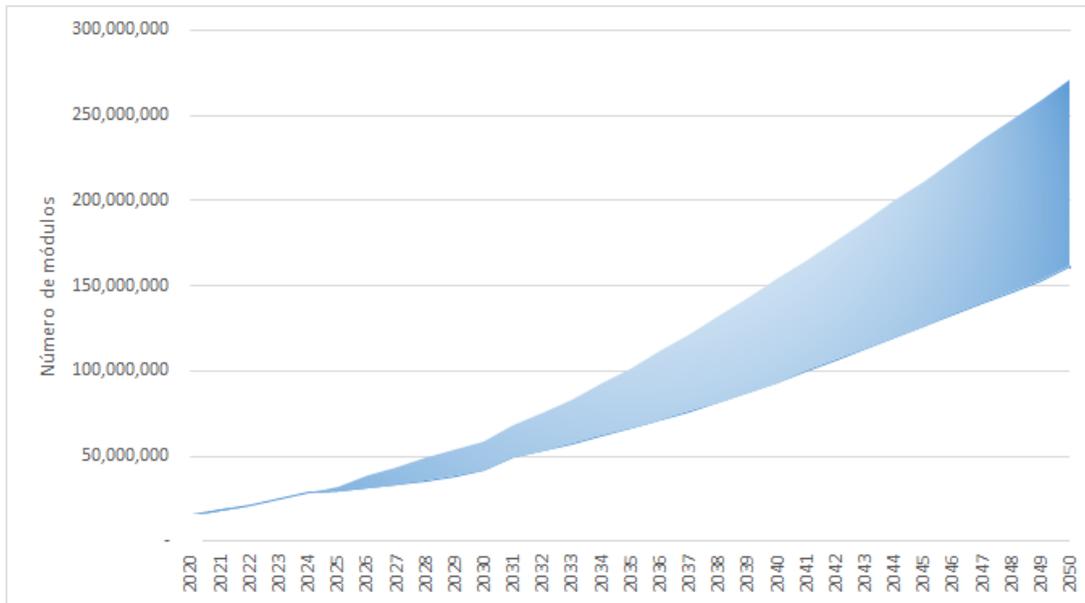
En base a lo anterior, se realizó la proyección del número de módulos fotovoltaicos al año 2050 para los 5 escenarios contemplados en el proceso de Planificación Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía. Asimismo, a estas proyecciones, se les realizó una sensibilización de que al año 2025 los módulos instalados en el país corresponden a aquellos que son capaces de entregar 500 [W] según lo descrito en el punto anterior.

fotovoltaica. Esta tiene por objetivo lograr una reflexión mayor de la radiación antes que llegue a la capa de aluminio del módulo.

³⁴ Ejemplo, módulos de Yingli Solar actualmente en el mercado.

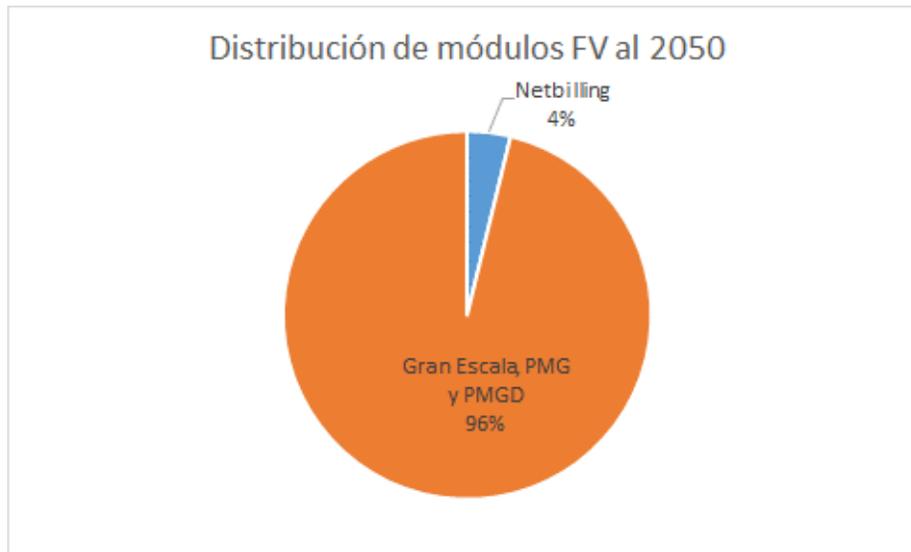
Tales proyecciones arrojaron 10 trayectorias de la instalación de módulos fotovoltaicos en el país (de todas las tipologías consideradas), en donde en la siguiente figura se refleja una nube de tendencias y las envolventes corresponden a los escenarios de menor y mayor entrada de proyectos fotovoltaicos respectivamente.

Figura 16: Proyecciones de módulos fotovoltaicos en Chile al año 2050



Lo anterior, permite contar con un rango de confiabilidad de proyecciones y tendencias futuras, en donde al año 2050 se tendrá un abanico de posibilidades que va entre cerca de 161 millones hasta casi 270 millones de módulos fotovoltaicos. Asimismo, de estos módulos prácticamente en su totalidad corresponden a proyectos de gran escala, PMG o PMGD, versus a la menor participación de proyectos del tipo netbilling, tal como se observa en los siguientes gráficos.

Figura 17: Distribución de módulos fotovoltaicos por tipología al año 2050³⁵.



Lo anterior, muestra que los módulos de proyectos netbilling tendrán un aumento en la participación versus lo que se tiene en la actualidad, pasando de un 1% a marzo de 2020 a un 4% en todos los casos al año 2050. Asimismo, asumiendo que en el futuro no existirá un retiro de centrales solares fotovoltaicas, gran parte de los módulos instalados al año 2050 corresponderán a aquellos basados en silicio, dado que en los supuestos asumidos se considera que esta será la tecnología predominante en los proyectos nuevos, según se muestra en las siguientes figuras y dependiendo del caso de proyección de módulos.

³⁵ El gráfico para el caso de menor y mayor instalación de módulos fotovoltaicos tienen el mismo porcentaje de participación por tipo de proyecto, por lo que se incorpora una sola figura.

Figura 18: Distribución de tecnología de módulos FV al 2050 en el caso de menor instalación de módulos.³⁶

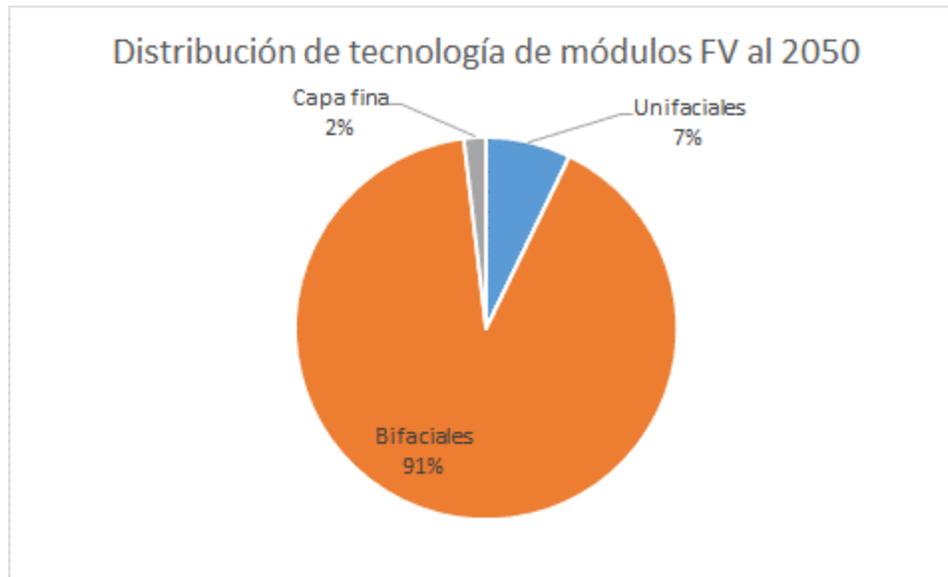
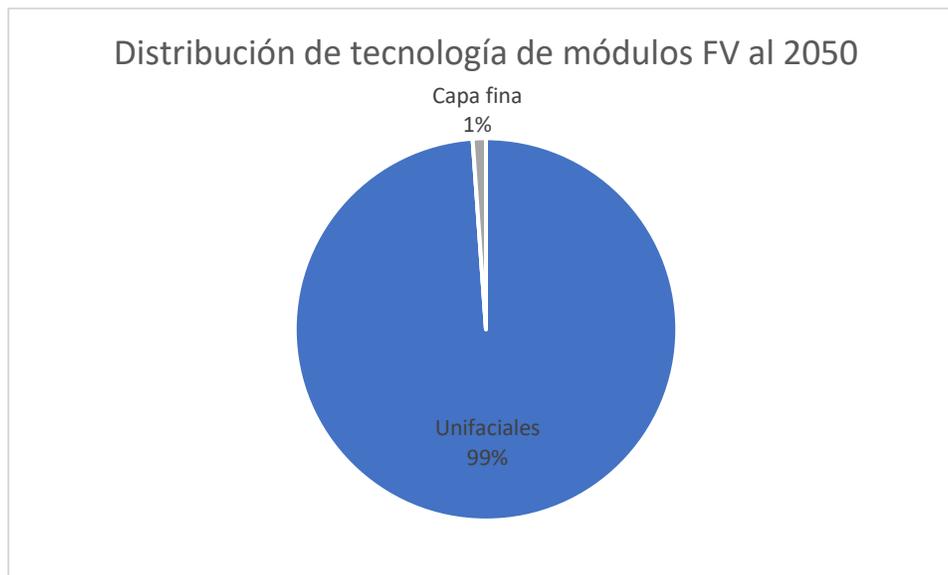


Figura 19: Distribución de tecnología de módulos FV al 2050 en el caso de mayor instalación de módulos.³⁷



En vista de lo anterior, fue posible calcular la cantidad de materiales componentes de los módulos fotovoltaicos proyectados, teniendo una proyección de estos al año 2050 en el caso de mayor instalación de módulos o en el caso de menor instalación de módulos.

³⁶ Fuente: Elaboración propia.

³⁷ Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Proyección de materiales componentes de módulos FV acumulados en Chile al 2050.

<i>Material</i>	<i>Estimación total país 2050</i> <i>[toneladas]</i>	
	Caso menor instalación módulos	Caso mayor instalación módulos
<i>Vidrio</i>	3,987,609	4,410,158
<i>Polímeros (EVA, Tedlar)</i>	141,580	444,874
<i>Aluminio</i>	372,204	621,118
<i>Silicio</i>	73,877	124,565
<i>Cobre</i>	22,163	37,369
<i>Plata</i>	214	361
<i>Boro</i>	3,694	6,228
<i>Fósforo</i>	3,694	6,228
<i>Dióxido de estaño</i>	3,694	6,228
<i>Plomo</i>	3,694	6,228
<i>Estaño</i>	3,694	6,228
<i>Cadmio</i>	5	5
<i>Telurio</i>	123	123

Dadas las proyecciones, se tiene que los dos casos extremos de instalación de módulos fotovoltaicos arrojan que existirán entre casi 4 y 4.4 millones de toneladas de vidrio como componentes de estos al año 2050³⁸. Asimismo, según los supuestos adoptados, las tecnologías basadas en silicio tendrán la mayor participación a tal año, lo que se ve reflejado en que se estima que este material alcanzaría entre 73 a 124 mil toneladas en componentes.

Estas cifras serán materia de análisis en las siguientes entregas del estudio, en cuanto a las implicancias que tienen para el país y las estrategias que se deben adoptar en cuanto a reutilización, reciclaje, reparación, entre otros aspectos. Con respecto a estos últimos puntos es que, en la siguiente sección, se esbozan los supuestos que se deben adoptar en siguientes entregas del estudio, para elaborar diversos escenarios de reutilización y reciclaje, en base a los residuos que se tenga a tal año.

³⁸ Cabe señalar que esta proyección no corresponde a residuos, y solo identifica el stock de materiales que se tendrá al año 2050.

5.4 Escenarios de reutilización y reciclaje

A partir de los datos de materialidad de módulos y la respectiva proyección realizada, descrita anteriormente, se deben proyectar diversos casos de reutilización y reciclaje de módulos para evaluar diversas propuestas y medidas, las cuales son objeto de las siguientes entregas del estudio.

Tales casos de reutilización y reciclaje deben considerar diversos supuestos, los que el equipo consultor plantea a modo de ejemplo con tal de validarlos con la contraparte técnica para el siguiente entregable del estudio. Estos supuestos son:

- Se propone considerar que los módulos fotovoltaicos se los da de baja para otros usos (reciclaje o reutilización) al cabo de 25 años, ya que es el fin de su vida útil y de la garantía entregada por los fabricantes. Cabe señalar que este supuesto es un elemento fuerte, dado que las proyecciones realizadas en el marco de la PELP del Ministerio de Energía no consideran la salida de centrales FV.
- Se considera una tasa de reemplazo de módulos (ej. fallas), en cuanto al número de módulos a retirar de un 0.75% anual. Si bien, no existe información de tasa de fallas de módulos en el caso chileno, de las entrevistas sostenidas se extrae que es un porcentaje menor al 1% (ej. roturas, piedrazos, fallas de circuitos, etc.).
- Se modelarán escenarios que combinen tanto reutilización como reciclaje en forma paralela, con tal de analizar casos extremos y los respectivos planes de acción. Además, se modelarán escenarios que vean reutilización y reciclaje en forma conjunta.
- Se propone considerar una duración de los paneles de 50 años, por lo que, en el caso de la reutilización, no se alcanzan a dar de baja los paneles reutilizados en el horizonte de 2050. Si bien los fabricantes no informan una vida útil efectiva de los módulos, es decir cuando estos dejarán de operar producto de una degradación de sus materiales, se asume que aquello será en un período superior a 50 años.
- Se supondrán estimaciones de mano de obra y de gestores necesarios para reciclar los módulos respectivos, en caso de que se encuentre disponible en experiencias internacionales.

Tales supuestos, corresponderán a la base para estimar diversas posibilidades de reciclaje, reutilización y descarte de componentes de módulos fotovoltaicos al 2050, con las respectivas medidas y vías de acción que debe adoptar la autoridad. Lo anterior, tal como se abordó en el capítulo previo, deberá sustentarse en las definiciones de la Ley 20.920 en cuanto AEE, de lo que será materia del siguiente entregable del estudio.

6 Referencias

- 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*.
- Energía Abierta. (14 de 05 de 2020). *Generacion Distribuida - Instalaciones Inscritas*.
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- 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>
- NREL. (2012). Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- Pinho JT, G. (2014). Engineering manual for photovoltaic systems retrieved from Rio de Janeiro: CEPEL—CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.
- 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.
- Solarity. (10 de Junio de 2020). *Trends for PV Industry in 2020*. Obtenido de <https://solarity.cz/blog/trends-for-pv-industry-in-2020/>
- 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>
- VDMA. (2019). *International Technology Roadmap for Photovoltaic*.

7 Anexos

7.1 Respuestas entrevistas

Disponibles como archivos adjuntos por cada entrevista realizada hasta el momento.

7.2 Base datos de proyectos y módulos FV

Disponible como archivo adjunto en planilla Excel.