



Tecnología Fotovoltaica de CdTe de First Solar:  
Evaluación Medioambiental, de Salud y  
Seguridad

**Informe final**

Octubre 2013

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA  
CENTRO NACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (CENER)**

**ÁREA DE ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO  
FUNDACIÓN CHILE**

ÍNDICE	PÁGINA
<b>1.- RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>5</b>
1.1.- OBJETO .....	5
1.2.- ALCANCE .....	5
1.3.- METODOLOGÍA.....	5
1.4.- CONCLUSIONES.....	6
<b>2.- INFORME TÉCNICO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.- ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE PROCESO DE CdTe PARA LA PRODUCCIÓN DE MÓDULOS FV.....</b>	<b>10</b>
2.1.1.- ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS Y DE SUS SUMINISTRADORES.....	11
2.1.2.- PROCESO DE FABRICACIÓN .....	14
2.1.3.- PROCESO DE RECICLAJE.....	16
2.1.4.- POLÍTICAS DE MEDIO AMBIENTE, SALUD Y SEGURIDAD.....	18
2.1.5.- ANÁLISIS DE LOS SUBPRODUCTOS PROCEDENTES DE PRODUCCIÓN .....	22
2.1.5.1.- Emisiones al aire .....	22
2.1.5.2.- Emisiones al agua .....	23
2.1.5.3.- Otros desechos sólidos .....	24
2.1.5.4.- Sustentabilidad .....	24
<b>2.2.- ASPECTOS DE CICLO DE VIDA DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE CdTe DE FIRST SOLAR .....</b>	<b>26</b>
2.2.1.- TIEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO (EPBT) .....	26
2.2.2.- EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	30
2.2.3.- EMISIONES DE CADMIO EN EL CICLO DE VIDA .....	34
2.2.4.- DISPONIBILIDAD DE TELURIO .....	36
2.2.5.- USO DE AGUA.....	38
2.2.6.- USO DE SUELO Y BIODIVERSIDAD .....	40
2.2.7.- COSTES EXTERNOS .....	42
<b>2.3.- SEGURIDAD DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE CdTe .....</b>	<b>44</b>
2.3.1.- CERTIFICACIONES DE SEGURIDAD Y FIABILIDAD .....	44
2.3.2.- ROTURA .....	45
2.3.3.- CIRCUNSTANCIAS PELIGROSAS (FUEGO) .....	47
2.3.4.- DEGRADACIÓN.....	49
2.3.5.- FIN DE LA VIDA ÚTIL .....	51
<b>3.- ANEXOS.....</b>	<b>53</b>

---

<b>3.1.- COMPOSICIÓN REDES ELÉCTRICAS CHILENAS: SIC &amp; SING.....</b>	<b>53</b>
3.1.1.- COMPOSICIÓN RED ELÉCTRICA SING .....	53
3.1.2.- COMPOSICIÓN RED ELÉCTRICA SIC .....	54
<b>3.2.- DATOS PARA OTROS SISTEMAS FV .....</b>	<b>55</b>
<b>3.3.- TASAS DE EMISIÓN DE GEI PARA DIFERENTES FUENTES ELÉCTRICAS.....</b>	<b>56</b>

ÍNDICE DE FIGURAS .....	PÁGINA
<b>Figura 1</b> Comparación entre la toxicidad del Cd y del CdTe.....	13
<b>Figura 2</b> Representación esquemática de la arquitectura de los módulos de First Solar .....	15
<b>Figura 3</b> Proceso de fabricación de First Solar .....	16
<b>Figura 4</b> Versión 2 de la tecnología de reciclaje de módulos de First Solar .....	17
<b>Figura 5</b> Niveles promedio de Cd ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en las fábricas de Perrysburg (Estados Unidos) y Kulim (Malasia) .....	19
<b>Figura 6</b> Muestreo de la exposición del personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) por función de trabajo realizado trimestralmente .....	20
<b>Figura 7</b> Niveles medios de Cd en sangre y orina comparados con el límite definido por la OSHA para la fábrica de Perrysburg (Estados Unidos).....	20
<b>Figura 8</b> Niveles medios de Cd en sangre y orina comparados con el límite definido por la OSHA para la fábrica de Kulim (Malasia) .....	21
<b>Figura 9</b> Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales .....	23
<b>Figura 10</b> Hoja de ruta de la eficiencia de los módulos de CdTe de First Solar .....	25
<b>Figura 11</b> Tiempo de Retorno Energético [años] para diferentes tecnologías FV. Irradiación estandarizada en $1700 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{año}$ . .....	27
<b>Figura 12</b> Tiempo de Retorno Energético (EPBT) [año] para diferentes sistemas fotovoltaicos de CdTe y radiaciones. ....	30
<b>Figura 13</b> Emisiones de GEI para diferentes tecnologías FV. Radiación estandarizada en $1700 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{año}$ . ....	31
<b>Figura 14</b> Emisiones GEI [ $\text{g CO}_2\text{-eq.}/\text{kWh}$ ] para diferentes sistemas fotovoltaicos de CdTe y radiaciones. ....	33
<b>Figura 15</b> Emisiones GEI [ $\text{g CO}_2\text{-eq.}/\text{kWh}$ ] para diferentes fuentes de energía eléctrica. ....	33
<b>Figura 16</b> Emisiones atmosféricas de Cd de ciclo de vida para distintas opciones de generación eléctrica. ....	36
<b>Figura 17</b> Estrategias de gestión de ciclo de vida para la disponibilidad de telurio. ....	38
<b>Figura 18</b> Abstracción de agua de ciclo de vida para distintas fuentes de generación eléctrica .....	39
<b>Figura 19</b> Ejemplo de patrón de rotura típico de los módulos de First Solar .....	46

---

## **1.- RESUMEN EJECUTIVO**

### **1.1.- OBJETO**

El objetivo del presente informe es evaluar, desde un punto de vista independiente, los aspectos medioambientales, de salud y de seguridad (*Environmental, Health and Safety, EHS*) de los módulos fotovoltaicos con tecnología de CdTe desde el punto de vista tecnológico y durante su periodo de funcionamiento en campo en el contexto del comienzo de operaciones de First Solar en Chile y Sudamérica.

La evaluación independiente llevada a cabo en el presente estudio ha sido realizada por CENER y Fundación Chile en un proyecto conjunto.

### **1.2.- ALCANCE**

Este informe analiza la tecnología de producción de First Solar, comenzando con el estudio de las materias primas, los procesos de fabricación y de reciclaje de los módulos, incluyendo el análisis de la secuencia de procesos, las etapas de modificación de materiales y los controles de seguridad aplicados en línea. Se realizará también un estudio del tratamiento y la eliminación de los subproductos generados. Además, se analizan aspectos del ciclo de vida de la tecnología fotovoltaica de CdTe de First Solar, incluyendo el tiempo de retorno energético, las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones de Cd a la atmósfera, la disponibilidad de telurio, el uso de agua, los impactos sobre la biodiversidad, el uso del suelo y los costes externos. Por último, se llevará a cabo una evaluación de los aspectos de seguridad durante el período de funcionamiento de los módulos de CdTe, teniendo en cuenta cuatro aspectos principales: roturas, incendios, degradación (lixiviación) y disposición al final de su vida útil.

### **1.3.- METODOLOGÍA**

La metodología aplicada para la elaboración del presente informe se ha basado en una búsqueda exhaustiva de datos y de información general. Se han utilizado artículos e informes publicados por científicos reconocidos, organismos internacionales e institutos de investigación y desarrollo, así como la información proporcionada por First Solar sobre su tecnología y sistemas de gestión. La información revisada se compara y se somete a un análisis crítico basado en la experiencia y el conocimiento en materia de tecnología fotovoltaica existente en el Departamento de Energía Solar Fotovoltaica de CENER y en el Área de Energía y Cambio Climático de Fundación Chile.

## 1.4.- CONCLUSIONES

Después del análisis detallado de los artículos científicos más recientes y de la información interna proporcionada por First Solar en relación con su tecnología de CdTe para la fabricación de módulos fotovoltaicos, las conclusiones extraídas se resumen en los siguientes párrafos:

### **Aspectos medioambientales, de salud y de seguridad (EH&S) de la tecnología de CdTe de First Solar**

- El cadmio se obtiene como subproducto de la fundición del zinc, del plomo y del cobre, por tanto, su producción no depende de la demanda del mercado FV. En los módulos fotovoltaicos de First Solar, el cadmio se encuentra en forma de un compuesto estable, CdTe, lo que proporciona un uso beneficioso y seguro para este metal pesado considerado contaminante y que, de otro modo, se almacenaría para su uso futuro, o se eliminaría en vertederos como residuo nocivo.
- Las fábricas de First Solar están equipadas con una tecnología de última generación para el control de emisiones de cadmio al aire interior y exterior. Las fábricas de First Solar también cuentan con la tecnología necesaria para tratar los residuos líquidos provenientes de la fabricación, incluido el proceso de reciclaje de los módulos. Las emisiones de cadmio a la atmósfera y a las aguas residuales son muy inferiores a los límites establecidos por las regulaciones locales. Todas las fábricas de First Solar están certificadas de acuerdo a las normas ISO 9001:2008, ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007.
- El Programa de Gestión de Higiene Industrial de First Solar para la gestión del cadmio incluye el muestreo del aire al que está expuesto el personal, el área de trabajo y el equipamiento, la vigilancia médica para todos los empleados afectados, incluyendo análisis de sangre y orina, controles administrativos con programas y políticas escritas, protocolos para los equipos de protección individual, actividades de limpieza de la fábrica y de formación para los empleados. A este respecto, se aplica una estrategia global de muestreo de aire trimestralmente, de la cual se puede concluir que el nivel de cadmio en el aire está siempre muy por debajo de los límites de exposición ocupacional (*Occupational Exposure Limits, OEL*). Como actividades complementarias a la monitorización del aire, First Solar realiza exámenes médicos de seguimiento. Los resultados de estos exámenes de salud demuestran que los niveles de cadmio en sangre y orina están muy por debajo de los definidos por la Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo (*Occupational Safety & Health Administration, OSHA*) de Estados Unidos.

---

### **Aspectos de ciclo de vida de los módulos FV de CdTe de First Solar: Uso de energía y potenciales impactos ambientales**

- Existe amplia evidencia de que, desde una perspectiva de ciclo de vida, la tecnología FV de CdTe es una opción preferible en términos ambientales cuando se compara con combustibles fósiles y, hasta cierto punto, con otras tecnologías FV, considerando emisiones de gases de efecto invernaderos, tiempo de retorno energético, uso de agua, emisiones atmosféricas de cadmio e impactos sobre la biodiversidad.
- Las altas radiaciones solares del norte de Chile resultan en un desempeño ambiental aún mejor por unidad de energía producida en comparación con la mayor parte de los estudios publicados. El tiempo de retorno energético para sistemas FV de CdTe instalados en el norte de Chile se estima entre 0,4 y 0,6 años, mientras que las emisiones de gases de efecto invernadero serían de aproximadamente 12 g CO<sub>2</sub>eq/kWh.
- La tecnología FV de First Solar ofrece un prospecto promisorio para proporcionar una fuente energética de bajo impacto ambiental, tanto en Chile como globalmente, particularmente cuando se implementan mejores prácticas asociadas a uso de suelos, manejo de la biodiversidad y recolección y reciclaje de los módulos al fin de su vida útil.
- En base a costos totales, incluyendo el costo privado (costo nivelado de la energía) más la suma de los costos ambientales y un costo de desempeño asociado a la generación variable, la tecnología FV de CdTe es competitiva con respecto a combustibles fósiles, tales como carbón y gas natural.

### **Aspectos medioambientales, de salud y de seguridad (EH&S) de los módulos FV de CdTe de First Solar durante su periodo de funcionamiento**

- En condiciones de funcionamiento/operación, los módulos FV de CdTe de First Solar no generan ningún tipo de emisiones contaminantes, a diferencia de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.
- En el caso improbable de que se produjera un incendio o una rotura del módulo, se ha demostrado, a través de estudios científicos, que las emisiones de cadmio al aire, al agua y al suelo son insignificantes y no representan un riesgo potencial ni para la salud humana ni para el medio ambiente.
- Al final de su vida útil, el riesgo de propagación incontrolada de Cd se considera insignificante si los módulos se desechan en vertederos aprobados de acuerdo a la normativa del país. El desecho sin control de los módulos de CdTe supone mayores riesgos medioambientales en comparación con su eliminación controlada, debido básicamente a la supervisión experta involucrada. La eliminación responsable de desechos es importante para todas las tecnologías FV ya que en esta industria, es



---

común el uso de materiales medioambientalmente sensibles (por ejemplo, Pb, Cd, y compuestos de Se).

*Como resumen, en relación a los procesos de fabricación, First Solar ha desarrollado de forma continua políticas, prácticas, procedimientos y sistemas de gestión excelentes con el fin de proteger la salud y la seguridad de sus trabajadores. En condiciones normales de funcionamiento, los módulos fotovoltaicos de CdTe de First Solar no emiten contaminantes al aire, al agua y al suelo. En el caso excepcional de que ocurriera un accidente tal como un incendio o la rotura de un módulo, se ha demostrado que la emisión de cadmio producida es insignificante y no representa un riesgo potencial ni para la salud humana ni para el medio ambiente. Al final de su vida útil, el reciclaje de los módulos FV de CdTe (opción recomendada cuando sea posible) o su eliminación en un vertedero autorizado garantiza que el riesgo siga siendo insignificante.*

---

## 2.- INFORME TÉCNICO

La contaminación medioambiental y el calentamiento global son temas cada vez más preocupantes. La producción de electricidad mediante plantas basadas en combustibles fósiles ha causado en los últimos años diversos problemas entre los cuales se encuentran trastornos de salud, lluvia ácida y el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, así como de las emisiones de partículas metálicas pesadas. A fin de disminuir estas emisiones, hace unos años se comenzó a investigar y a aplicar el uso de fuentes de energía más sostenibles (“verdes”). En este sentido, la Unión Europea aprobó un objetivo ambicioso mediante el cual se pretende alcanzar una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo total de energía de la Unión Europea en 2020. De modo similar, en Chile, el 20% de la energía generada deberá provenir de fuentes renovables (eólica, solar, geotérmica, biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas <20MW) para el año 2025.

Entre las principales alternativas a la producción de energía basada en combustibles fósiles se encuentran la energía nuclear, solar, geotérmica, eólica e hidroeléctrica. La energía solar fotovoltaica es un tipo de generación eléctrica que en los últimos años ha suscitado un creciente interés. La posibilidad de obtener energía directamente del sol y su modularidad son las razones principales de ese interés. Además, la energía solar fotovoltaica no produce emisiones al medio ambiente durante su periodo de funcionamiento y el suministro de energía del sol es ilimitado y está garantizado. Más aún, recientemente el incremento en eficiencia y reducción del coste de los módulos fotovoltaicos de silicio ha permitido conseguir la paridad de red en varios países.

Inicialmente, las células solares fotovoltaicas estaban basadas en obleas de silicio monocristalino, aunque el silicio en fase gaseosa también podía depositarse directamente sobre un sustrato con fines fotovoltaicos. No obstante, hay que tener en cuenta que el silicio no es el único material semiconductor con la capacidad de generar electricidad bajo la radiación solar. En los últimos años otros materiales semiconductores con propiedades similares y las tecnologías de lámina delgada se han convertido en candidatos prometedores.

En la actualidad, las tres tecnologías principales de lámina delgada son las basadas en silicio amorfo/microcristalino, telurio de cadmio y diselenuro de indio y cobre (y sus derivados). Estas tecnologías tienen varias características en común como pueden ser:

- Requieren sólo pequeñas cantidades de material semiconductor, siendo el grosor típico de la lámina semiconductora de unos pocos micrómetros.
- Son estables a largo plazo en condiciones de exposición en exterior.
- Requieren un aporte de energía mínimo en comparación a la tecnología basada en silicio cristalino.
- Se pueden fabricar mediante un amplio abanico de procesos tecnológicos.

En las dos últimas décadas se han dedicado importantes esfuerzos en investigación y desarrollo en las tecnologías de lámina delgada que han convertido en realidad las expectativas puestas en estas tecnologías.

En el presente estudio se analiza la tecnología de proceso de First Solar, partiendo del análisis de los materiales utilizados, el proceso de fabricación, incluyendo el análisis de la secuencia de proceso, las etapas de modificación de los materiales, el proceso de reciclaje y los controles de seguridad aplicados en línea. El análisis de los aspectos medioambientales relacionados con el proceso de fabricación finaliza con un estudio del tratamiento y eliminación de los subproductos producidos durante el proceso de fabricación.

Los aspectos del ciclo de vida de la tecnología de CdTe empleada por First Solar han sido revisados también y comparados con otras opciones de generación de electricidad. En este análisis se han considerado aspectos tales como el periodo de retorno energético (*Energy Payback Time*), emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de Cd a la atmósfera, reservas de telurio, uso de agua, impacto sobre la biodiversidad, uso de la tierra y costes externos.

Por último, se ha llevado a cabo una evaluación de los aspectos de seguridad durante el periodo de funcionamiento de los módulos, teniendo en cuenta cuatro aspectos fundamentales: rotura, fuego, degradación (lixiviación) y disposición al final de su vida útil.

Cabe destacar que desde 2005 y, a petición de First Solar, se han llevado a cabo al menos 9 estudios independientes realizados por expertos a fin de evaluar su tecnología de CdTe para la producción de módulos FV.

## **2.1.- ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE PROCESO DE CdTe PARA LA PRODUCCIÓN DE MÓDULOS FV**

En esta sección se analiza la tecnología de procesos de First Solar para la fabricación de módulos FV, partiendo del análisis de los materiales de partida utilizados, la evaluación de los suministradores de dichos materiales y de su política medioambiental. A continuación, se revisan tanto los procesos de producción como de reciclaje utilizados por First Solar, incluyendo la secuencia de proceso, las etapas de modificación de materiales y los controles de seguridad aplicados en línea, haciendo especial hincapié en los programas de medio ambiente, salud y seguridad propios de First Solar. Finalmente, se llevará a cabo un análisis de los subproductos generados durante el proceso de producción, su tratamiento y los procedimientos para su eliminación.

---

### 2.1.1.- ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS Y DE SUS SUMINISTRADORES

A fin de centrar los principales aspectos referentes al medio ambiente, la salud y la seguridad de la tecnología de lámina delgada basada en CdTe utilizada por First Solar, en esta sección se presentarán algunas consideraciones sobre las propiedades fisicoquímicas, presencia y abundancia en la naturaleza y el perfil de salud y seguridad del Cd, Te y el CdTe (material sintético).

El cadmio es un metal pesado que se encuentra de forma natural en la corteza de la tierra, en los océanos y en el medio ambiente. Tal y como ocurre con muchos otros metales pesados como el plomo, zinc, cromo, arsénico, cobalto, cobre, estaño, manganeso, níquel y mercurio su uso está ampliamente extendido tanto en la industria eléctrica como electrónica. El cadmio metálico posee un color gris metálico plateado y tiene un punto de fusión de 321°C y un punto de ebullición de 765°C.

El cadmio se encuentra en la corteza terrestre en las minas de zinc en forma de sulfuro de cadmio en una proporción de entre el 0,0001% y el 0,2%<sup>1</sup>. El método de separación más común en minería es el de flotación que proporciona un concentrado del mineral de zinc que es transferido a las fundiciones a fin de producir el metal. Para su purificación, el proceso electrolítico es el más extendido. Los residuos provenientes de este proceso junto con el polvo y humos producidos durante el proceso pirometalúrgico del zinc y del plomo son las materias primas utilizados para obtener Cd. La producción de cadmio viene determinada por la demanda del mercado de Zn, y los residuos de cadmio son almacenados hasta que alguna aplicación haga uso de ellos. China, Canadá y Estados Unidos son los mayores productores de Zn.

El telurio es un semi-metal muy escaso que se obtiene fundamentalmente como un subproducto de las minas de cobre y plomo. Los principales subproductos utilizados para la extracción del telurio son los limos obtenidos en la purificación de cobre y las espumas obtenidas en la purificación del plomo<sup>2</sup>.

El telurio de cadmio, empleado en aplicaciones fotovoltaicas, es un material sólido, sintético y de color negro, que se obtiene mediante reacción de sus elementos de partida, Cd y Te, tanto en fase gaseosa como en fase líquida. El CdTe es estable en condiciones atmosféricas, su punto de fusión es 1041°C y su punto de evaporación es 1050°C<sup>3</sup>. Aunque puede sublimar, la presión de vapor es 0 para condiciones normales y es de tan sólo 2,5 torr (0,003 atm) a 800°C<sup>4</sup>. El CdTe tiene una solubilidad muy baja en agua (su producto de solubilidad es  $9,5 \times 10^{-35}$  mol/L en comparación con el producto de solubilidad de 2,3 mol/L para el Cd), pero se disuelve en

---

<sup>1</sup> International Cadmium Association, <http://www.cadmium.org>

<sup>2</sup> V. Fthenakis, W. Wang, H. C. Kim, "Life cycle inventory of the production of metals used in photovoltaics", Renewable and Sustainable Energy Review, 13, 493-517, 2009

<sup>3</sup> P. Moskowitz, N. Bernhole, V. M. Fthenakis, R. Pardi, "Environmental health and safety issues related to the production and use of cadmium telluride photovoltaic modules", Advance in Solar Energy, vol.10, Chapter 4, American Solar Energy Society, Boulder CO, 1990

<sup>4</sup> "DOE and BNL Nomination of CdTe to the NTP", April 11, 2003

medios ácidos y oxidantes y puede descomponerse cuando se expone a la humedad atmosférica siendo capaz de reaccionar con agua y oxígeno a temperaturas elevadas<sup>4</sup>. El CdTe se caracteriza por unas propiedades de biodisponibilidad que son aproximadamente dos órdenes de magnitud inferiores a la biodisponibilidad del CdCl<sub>2</sub><sup>5</sup>. Esto significa que en contacto con el agua o con fluidos biológicos el CdTe no libera fácilmente iones Cd (Cd<sup>2+</sup>).

Además, existen varios estudios que muestran que la toxicidad y movilidad en el medio ambiente del CdTe es mucho menor que la del Cd y otros compuestos de Cd:

- Toxicidad aguda por ingestión y por inhalación. El estudio de Zayed and Philippe<sup>6</sup> realizado en ratas reveló que la concentración letal media (CL50) y la dosis letal media (DL50) del CdTe eran más de 3 órdenes de magnitud mayores que las del Cd.
- Estudios de toxicidad oral sub-crónica en el desarrollo reproductivo. En el estudio llevado a cabo por Chapin<sup>7</sup> no se detectó efecto alguno del CdTe en la reproducción de ratas macho o hembra para dosis suficientemente altas como para causar la reducción de la ganancia en peso corporal.
- Mutagenicidad. En el año 2010<sup>8</sup> Agh, realizó el ensayo de mutación inversa bacteriana (*Bacterial reverse mutation assay*, test de Ames) no encontrando ninguna actividad mutagénica, a diferencia de los resultados positivos de mutagenicidad obtenidos para el Cd.
- Toxicidad acuática aguda. En el estudio realizado por Agh en 2011<sup>9</sup>, no se encontraron efectos tóxicos en peces en situación de saturación acuática.

Estos resultados, en comparación con los del Cd, se resumen en la Figura 1.

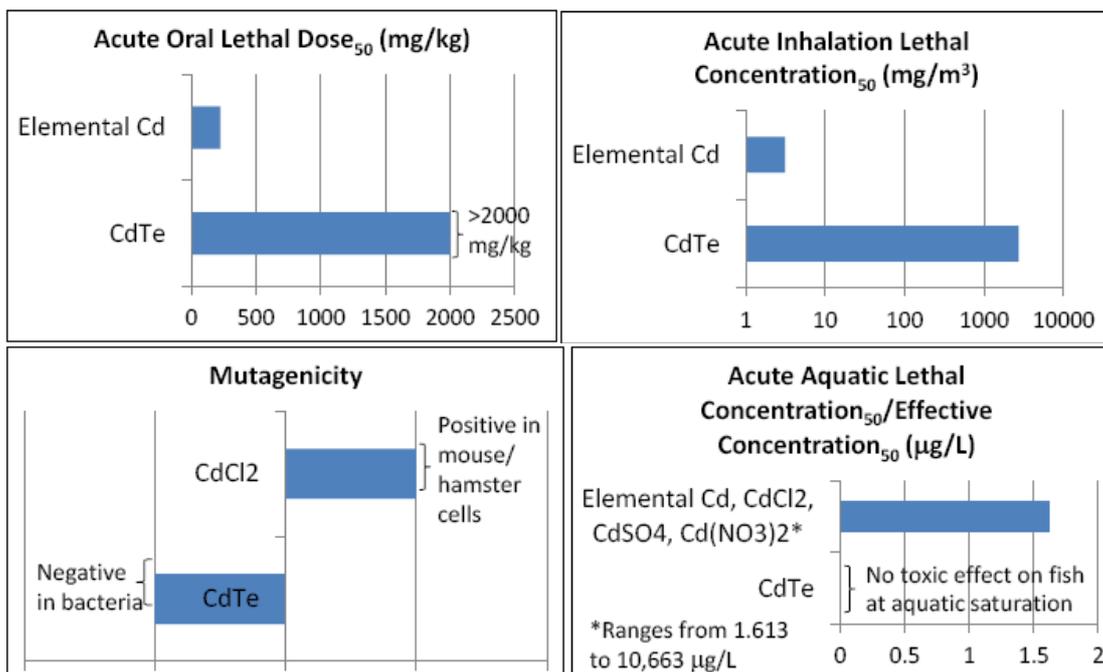
<sup>5</sup> T. Brouwers, "Bio-elution test on cadmium telluride", ECTX Consultant, Liège, Belgium

<sup>6</sup> P. Zayed, S. Philippe, "Acute oral inhalation toxicities in rats with cadmium telluride", *International Journal of Toxicology*, Vol 28, N° 4, 259-265, 2009

<sup>7</sup> R. E. Chapin, M. W. Harris, J. D. Allen, E. A. Haskins, S. M. Ward, R. E. Wilson, B. J. Davis, B. J. Collins and A. C. Lockhart, "The systematic and reproductive toxicities of copper indium diselenide, copper gallium diselenide and cadmium telluride in rats", *Understanding and managing health and environmental risks of CIS, CGS and CdTe photovoltaic module production and use: A workshop (BNL-61480)*, eds. P. D. Moskowitz, K. Zweibel and M. P. DePhilips, Brookhaven National Laboratory, (Chapter 2), 1994

<sup>8</sup> Agh, "The testing of cadmium telluride with bacterial reverse mutation assay", Lab Research Ltd, Veszprém, Hungary, 2010

<sup>9</sup> Agh, "Acute toxicity test with cadmium telluride on zebrafish", Lab Research Ltd, Veszprém, Hungary, 2011



**Figura 1** Comparación entre la toxicidad del Cd y del CdTe<sup>10</sup>

A este respecto, la Agencia Europea de Productos Químicos (European Chemicals Agency, ECHA) ha notificado que el CdTe no será considerado ya como nocivo por ingestión ni por contacto con la piel, y la clasificación de la toxicidad para la vida acuática se ha reducido<sup>11</sup>(el documento original no ha sido revisado).

Sin embargo, la producción de CdTe en polvo implica el uso de Cd y de Te, y el cadmio y todos los compuestos que contengan Cd todavía están clasificados por la OSHA con el mismo nivel de nocividad.

El CdTe es un semiconductor con una energía de la banda prohibida (directa) de 1.5 eV, casi ideal para la conversión terrestre de la energía solar. Su alto coeficiente de absorción y la amplia variedad de técnicas de fabricación de bajo coste con las que se puede obtener, han hecho del telurio de cadmio uno de los materiales más prometedores para la producción a gran escala de energía solar fotovoltaica.

La tecnología de fabricación de módulos de First Solar utiliza como materia prima CdTe en forma de polvo negro. Como se ha descrito antes, el CdTe se produce a partir de la reacción del Cd y del Te mediante diferentes técnicas. En función de la tecnología utilizada por los productores, la naturaleza de los precursores y el grado de calidad pueden variar. First Solar compra directamente el compuesto CdTe a sus proveedores.

<sup>10</sup> S. Kaczmar, "Evaluating the read-across approach on CdTe toxicity for CdTe photovoltaics", Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) North America, 32nd Annual Meeting, 2011

<sup>11</sup> M. Held, C. Hagendorf, J. Bagdhn and R. Wehrspohn. Scientific Comment of Fraunhofer to Life Cycle Assessment of CdTe Photovoltaic, <http://www.csp.fraunhofer.de/presse-und-veranstaltungen/details/id/47>, 2012

La identidad de los proveedores de First Solar se considera información confidencial y no ha sido revelada. Sin embargo, First Solar tiene una política que fomenta y anima a sus proveedores a certificarse en las mismas normas ISO (ISO 9001: Sistema de Gestión de Calidad e ISO14001: Sistema de Gestión Medioambiental) en las que está certificada la compañía. Además, First Solar requiere a sus proveedores que cumplan con el Código de Conducta de la Coalición de Miembros de la Industria Electrónica (*Electronic Industry Citizenship Coalition Code of Conduct*) sobre medioambiente, ética, salud y seguridad, trabajo y sistemas de gestión.

De hecho, First Solar somete a auditorías medioambientales, realizadas por ellos mismos o por un tercero, a todos los proveedores relacionados con el cadmio, incluidos productos y servicios tales como la eliminación de residuos. Si resulta necesario, al proveedor se le aplica un plan de acción correctivo y se lleva a cabo el seguimiento de la actividad hasta que se completen todos los temas pendientes. Es más, First Solar comparte sus códigos de mejores prácticas sobre medio ambiente, salud y seguridad con sus proveedores para ayudarles a alcanzar un mejor cumplimiento en los aspectos de EHS.

Durante la visita a la planta de Perrysburg, First Solar proporcionó información adicional y documentación relativa a su estrategia de sostenibilidad, así como la Plantilla de Evaluación para la sustentabilidad de sus proveedores.

En cuanto a los aspectos medioambientales, de salud y de seguridad, no se ha profundizado más en la cadena de suministro por no disponer de la información.

## **2.1.2.- PROCESO DE FABRICACIÓN**

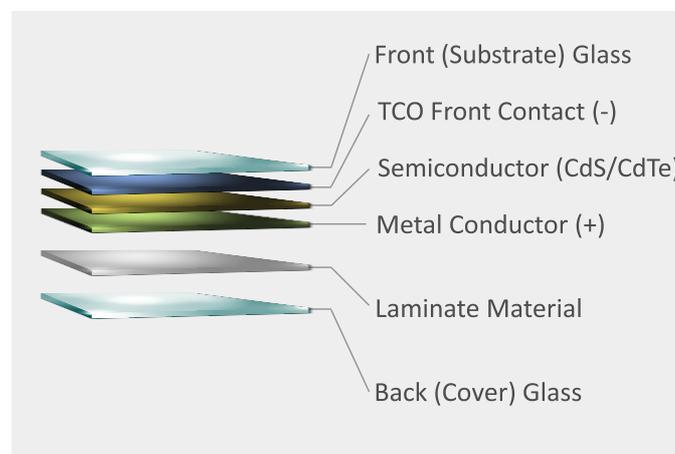
La fabricación de módulos FV de CdTe se basa en tres secuencias de proceso fundamentales: la primera se corresponde con el depósito de los semiconductores, donde se deposita el material semiconductor, responsable de la conversión de luz solar en electricidad; en segundo lugar, la formación de las células FV y en tercer lugar, el ensamblado del módulo final y la realización de ensayos.

La tecnología de fabricación de células fotovoltaicas de CdTe de First Solar se basa en la capacidad de sublimación del CdTe. A medida que se calienta, el CdTe se sublima produciendo moléculas gaseosas de  $CdTe_2$  que se vuelven a depositar sobre el sustrato.

La primera secuencia de proceso se inicia con el depósito sobre un sustrato de vidrio de una capa fina de óxido de estaño que sirve como contacto transparente y conductor (Transparent Conductive Oxide, TCO). El proveedor de vidrio es el encargado de aplicar la capa de TCO al vidrio. A continuación, se deposita una capa muy delgada de CdS (ventana) seguida por una capa fina de CdTe (absorbente). Las capas de CdS y de CdTe se depositan utilizando polvos

de esos mismos materiales mediante una técnica de depósito en fase vapor. A continuación, se pulveriza  $\text{CdCl}_2$  y se aplica un tratamiento térmico. Este proceso se lleva a cabo con el fin de re-cristalizarla estructura y mejorar las propiedades electrónicas del dispositivo. Hay que destacar que el  $\text{CdCl}_2$  se elimina del módulo después del proceso de re-cristalización. Por último, se deposita una capa de metal, usando técnicas de pulverización catódica, para crear el contacto posterior.

En la segunda secuencia, se conectan en serie las células fotovoltaicas individuales utilizando para ello tecnología láser. Por último, la tercera secuencia incluye el proceso de laminación donde se coloca un adhesivo polimérico intermedio y una placa de vidrio que se sellan térmicamente.



**Figura 2** Representación esquemática de la arquitectura de los módulos de First Solar<sup>12</sup>

Como se puede apreciar de la Figura 2, tras la secuencia de fabricación anteriormente descrita, el módulo final está formado por células fotovoltaicas de CdTe conectadas en serie con un espesor de película de menos de 10 micras y un contenido de cadmio encapsulado de aproximadamente  $7\text{g/m}^2$ , con los bordes aislados por un material resistente a la radiación solar y sellados entre dos placas de vidrio de aproximadamente 3mm de espesor cada una.

La esencia de la tecnología de CdTe de First Solar se basa en la propiedad de sublimación del CdTe. Bajo ciertas condiciones de presión y temperatura específicas, el CdTe se descompone en subcompuestos de origen Cd y Te. Esas especies en fase gaseosa se depositan sobre la superficie del sustrato en forma de lámina delgada de CdTe con propiedades semiconductoras. El proceso de First Solar utiliza una tecnología de depósito en fase vapor a alta velocidad capaz de depositarla fina capa semiconductor del módulo FV en menos de 40 segundos.

El proceso de fabricación de módulos solares de First Solar incluye los siguientes pasos:

<sup>12</sup>Sinha, P., "Life cycle materials and water management for CdTe photovoltaics". Solar Energy Materials & Solar Cells, 119, 271-275, 2013

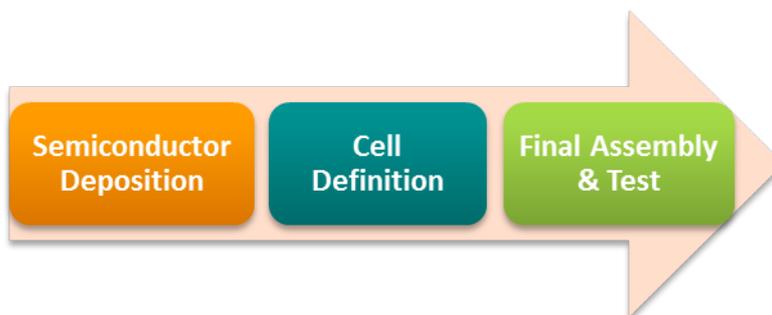


Figura 3 Proceso de fabricación de First Solar

A partir del análisis de los procesos químicos implicados en la secuencia de proceso anterior, se puede extraer que el Cd, Te, y/o CdTe están presentes, ya sea en fase gaseosa (polvo y humos) o disuelto en agua, en algunos pasos del proceso de fabricación y operaciones de mantenimiento.

- Los pasos 1 y 2 pueden tener Cd, Te y/o CdTe procedentes del propio proceso, de operaciones de mantenimiento y/o de los desechos de producción. Cabe señalar que First Solar utiliza sistemas de filtros HEPA para controlar las emisiones y mantener los valores por debajo de los límites de las normativas reguladoras.
- En el paso 3 la posibilidad de que existan esos materiales sólo puede deberse a módulos desechados.

### 2.1.3.- PROCESO DE RECICLAJE

First Solar ha instalado y puesto en funcionamiento plantas de reciclaje a escala comercial en cada una de sus fábricas (Estados Unidos, Alemania y Malasia). En estas plantas de reciclaje se procesan módulos desechados durante la fabricación, módulos en garantía y módulos que se encuentran al final de su vida útil. En el marco de la política de mejora continua de su programa de reciclaje, First Solar ha desarrollado una versión 2 de su proceso de reciclaje original. Los principales pasos de esta versión 2 del proceso de reciclaje de módulos de First Solar se muestran en la Figura 4. La principal mejora de la versión 2 es el uso de un reactor de columna de lixiviación estático (*static leach column reactor*) en vez de un reactor de tambor de lixiviación rotatorio (*rotary leach drum reactor*). Esta solución ofrece la ventaja de ser fácilmente ampliable y de reducir el coste de mantenimiento.

De acuerdo a la información suministrada sobre la tecnología de reciclaje de First Solar, se recupera hasta el 90% del peso del módulo, siendo la mayor parte vidrio que se puede utilizar en otros productos. La recuperación estimada de Cd y Te es de hasta el 95%. Este material semiconductor sin refinarse empaqueta para su posterior procesamiento por otras empresas que purifican el material semiconductor para ser utilizado en nuevos módulos. El material que no se



puede recuperar es eliminado de acuerdo a los requisitos de eliminación de residuos.



Figura 4 Versión 2 de la tecnología de reciclaje de módulos de First Solar

El proceso de reciclaje comienza reduciendo el tamaño de los módulos en un proceso de dos pasos. En un primer paso, una trituradora rompe el módulo en trozos, mientras que en el segundo paso, se utiliza un molino de martillo para triturar aún más el vidrio, los trozos de entre 4mm y 5mm de tamaño aseguran la separación entre vidrio y laminado. A continuación, las capas semiconductoras se eliminan en un medio ácido con peróxido de hidrógeno en un tambor de acero inoxidable que gira lentamente. Después de esto, el tambor se vacía lentamente en un clasificador donde los materiales de vidrio y laminado se separan de los líquidos donde un tornillo giratorio transporta el vidrio dejando atrás el líquido.

El líquido rico en metales se bombea a la unidad de precipitación donde precipitan los compuestos metálicos aumentando el pH en un proceso de tres etapas. La torta de filtración resultante rica en metales, que se empaqueta para su procesamiento por parte de terceras empresas. Con respecto al material de vidrio, un tamiz vibratorio separa el vidrio de las piezas de material laminado. Después, el vidrio se aclara en aguapara eliminar las capas semiconductoras residuales que pueden permanecer adheridas al cristal.

Hasta diciembre de 2012, en las instalaciones de First Solar en todo el mundo, se reciclaron aproximadamente 48.000 toneladas métricas de desechos de fabricación, devoluciones en garantía y módulos que llegaron al final de su vida útil de forma prematura.

Todas las plantas de First Solar incluyen la capacidad de reciclaje de módulos como un procedimiento habitual, por lo que los mismos protocolos de salud y seguridad utilizados para la producción de módulos se aplican para proteger a los trabajadores del polvo de CdTe producido durante el proceso de reciclaje.

#### **2.1.4.- POLÍTICAS DE MEDIO AMBIENTE, SALUD Y SEGURIDAD**

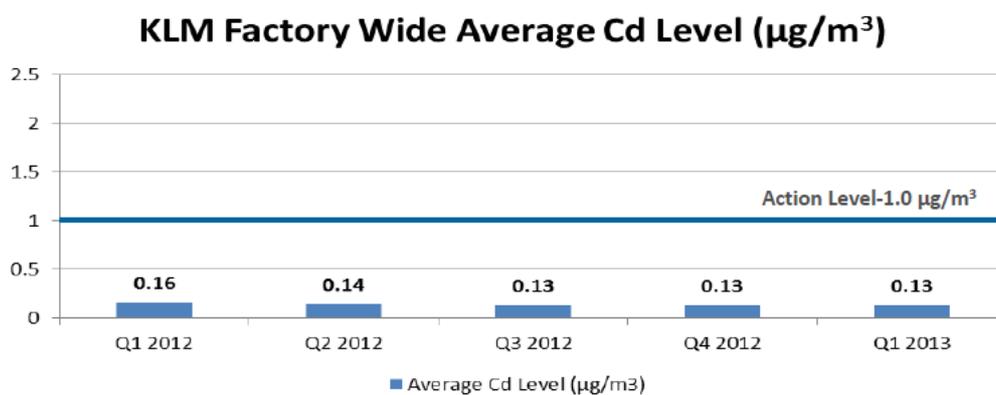
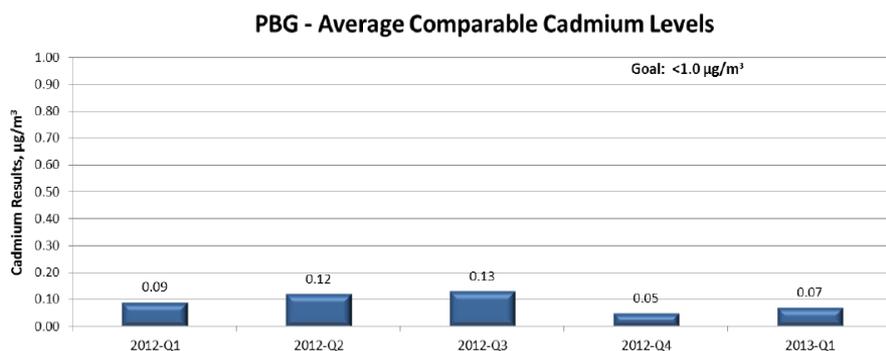
Para evitar cualquier riesgo relacionado con el medio ambiente, la salud y la seguridad (*Environment, Health and Safety*, EHS), First Solar ha implantado un control continuo y eficaz de la concentración de Cd en el aire del interior de la planta, los niveles de emisiones al ambiente y las concentraciones en los residuos. Este control se realiza también durante todas las operaciones de mantenimiento.

First Solar ha compartido con CENER un extenso dossier de documentación sobre sus procedimientos y políticas de EHS, así como sobre sus datos de emisiones actuales. Estos datos han sido analizados en detalle y se resumen a continuación.

First Solar posee, en todas sus fábricas, un diseño y sistema de control de emisiones de cadmio al aire, interior y al medio ambiente de primera clase. Todos los equipos de proceso involucrados en el uso del cadmio están conectados y gestionados por un sistema de control de filtros de alta eficiencia para partículas en aire (High Efficiency Particulate Air, HEPA) que proporciona una eficiencia de captura de partículas de tamaño superior a 0,1 micras del 99,97%. Cada filtro instalado se prueba utilizando los estándares de monitorización más estrictos disponibles (aerosol de poli-alfa-olefina) para asegurar la eficiencia de la captura. Además de esto, First Solar prueba cada sistema de ventilación (no sólo los filtros HEPA) con el fin de asegurar la integridad de todo el sistema y ha puesto en marcha un sistema de monitorización continuo de la velocidad del flujo de aire, la eficiencia y el control de la caída de presión bajo un exhaustivo control de ingeniería. En marzo de 2009, el Instituto BGAI para la Seguridad de los Trabajadores realizó una evaluación del sistema de aire y llegó a la conclusión de que *"se recomienda que los métodos utilizados por First Solar Manufacturing sean reconocidos como equivalentes a los reconocidos por asociaciones profesionales... Por otra parte, la monitorización en el lugar de trabajo es ejemplar"*.

El Programa de Gestión de Higiene Industrial de First Solar para la gestión del cadmio incluye muestreo del aire al que está expuesto el personal, el área y el equipamiento, vigilancia médica para todos los empleados afectados, incluyendo análisis de sangre y orina, controles administrativos con programas y políticas escritas, protocolos para los equipos de protección individual, limpieza de la fábrica y formación de los empleados. A este respecto, se realiza un protocolo global comparativo de muestreo de aire trimestralmente.

En la Figura 5, se muestran los niveles de Cd promedio en las fábricas de Perrysburg (PBG; Estados Unidos) y Kulim (KLM; Malasia) entre el primer trimestre (Q1) de 2012 y el primer trimestre (Q1) de 2013.

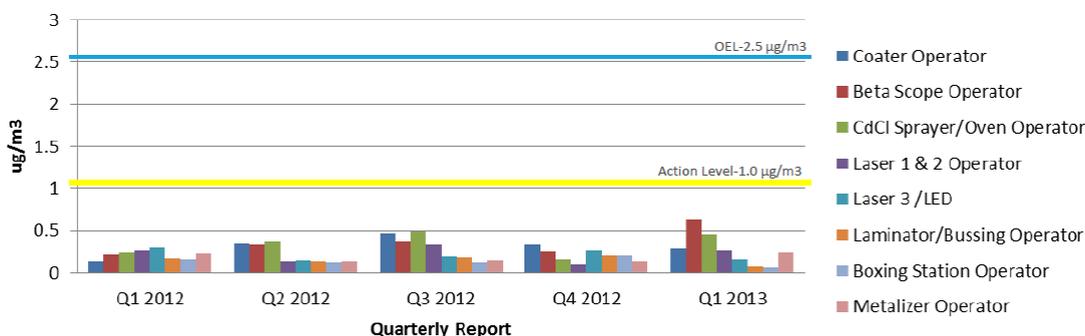


**Figura 5** Niveles promedio de Cd ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en las fábricas de Perrysburg (Estados Unidos) y Kulim (Malasia)

El nivel de acción de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de Cd representa el nivel para el cual la monitorización del aire deberá ser más frecuente y los controles de ingeniería evaluados y revisados.

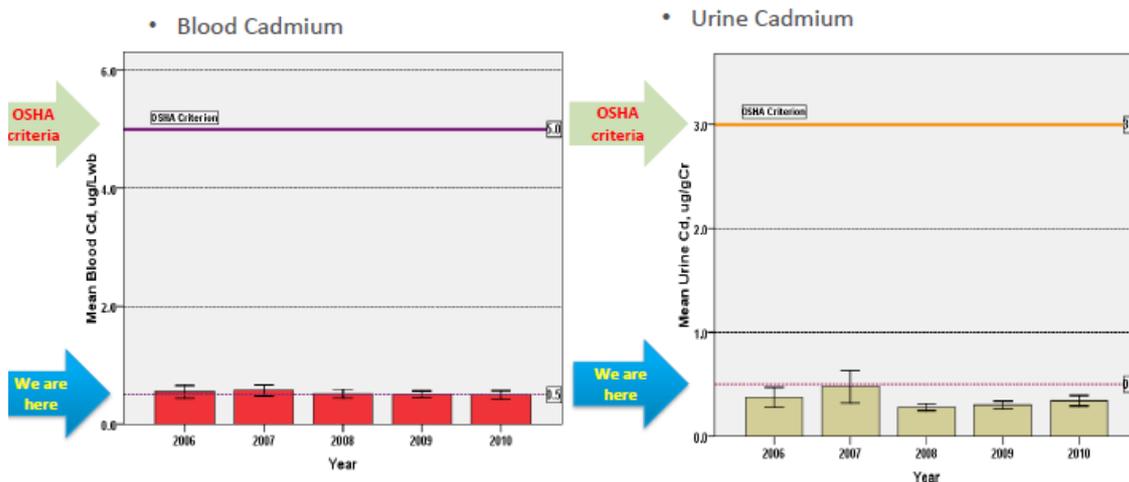
En la Figura 6, se muestran los resultados del muestreo de la exposición del personal, divididos por funciones de trabajo, entre el primer trimestre (Q1) de 2012 y el primer trimestre (Q1) de 2013. Este parámetro se mide también de forma trimestral abarcando toda la fábrica. El nivel OEL (Límite de exposición profesional) representa el nivel al cual un empleado puede estar expuesto durante un tiempo determinado sin protección respiratoria o controles de ingeniería. En Malasia los niveles de OEL para 8 y 12 horas son  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Sin embargo, First Solar ha establecido unos límites OEL propios más restrictivos,  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para 8 y 12 horas de exposición respectivamente. Como se puede apreciar en esta figura, el nivel de Cd está siempre muy por debajo tanto del nivel de acción como del OEL.

### Personal Exposure Sampling Result

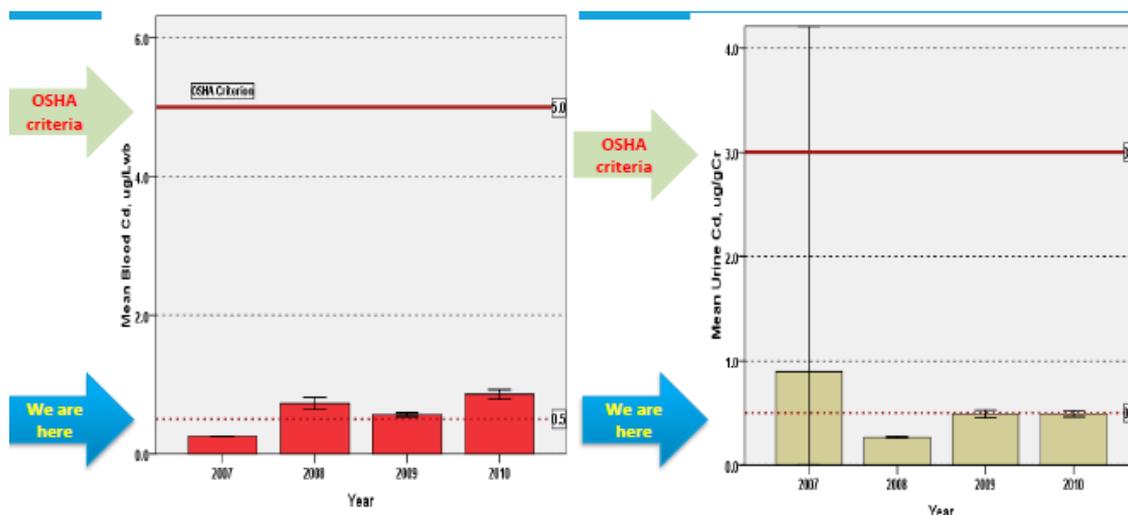


**Figura 6** Muestreo de la exposición del personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) por función de trabajo realizado trimestralmente

Como actividades complementarias a la monitorización del aire, First Solar realiza exámenes médicos de seguimiento, necesarios para identificar intervenciones preventivas y también para demostrar que los programas de seguridad son eficaces. En la Figura 7 y en la Figura 8 se muestran los niveles medios de Cd en sangre y orina medidos en las fábricas de Kulim (Malasia) y Perrysburg (Estados Unidos) respectivamente junto con los límites establecidos por la OSHA. Como se puede apreciar a partir de estas figuras, los niveles de Cd en ambas fábricas están muy por debajo de los criterios de la OSHA. La línea de puntos en el valor 0.5 muestra el límite de detección.



**Figura 7** Niveles medios de Cd en sangre y orina comparados con el límite definido por la OSHA para la fábrica de Perrysburg (Estados Unidos)



**Figura 8** Niveles medios de Cd en sangre y orina comparados con el límite definido por la OSHA para la fábrica de Kulim (Malasia)

Además, la compañía realiza una comparación de los niveles de Cd de los trabajadores después de un año de trabajo en First Solar. Las medidas muestran que, estadísticamente, no existe una diferencia significativa entre los niveles de Cd antes y después de haber sido contratados por First Solar<sup>13</sup>.

El protocolo de vigilancia médica de First Solar es revisado por médicos independientes especializados en salud laboral y los resultados son compartidos con los empleados. En la última revisión realizada en 2012 por el Dr. Michael L. Fischman<sup>13</sup>, se concluyó que *"Este... estudio sugiere claramente que no ha habido ningún impacto observable relacionado con el trabajo con Cd en First Solar basado en los exámenes de control biológicos utilizando varios criterios"*. Antes de este estudio, otras investigaciones médicas proporcionaron resultados similares (por ejemplo, el Dr. Fahrang Akbaren 2009).

Con el fin de garantizar un lugar de trabajo seguro para todos los empleados, First Solar ha asumido un fuerte compromiso en materia de salud y seguridad. En este sentido, cuentan con expertos en todas las disciplinas relacionadas con aspectos de medio ambiente, salud y seguridad (EHS). La estrategia desarrollada en las nuevas plantas de fabricación, se basa en el concepto de "copia inteligente" (*smart copy*), incluyendo las políticas, prácticas y sistemas de gestión.

Todas las fábricas de First Solar han recibido las siguientes certificaciones sobre sistemas de gestión:

- ISO 9001:2008 de Calidad (Declaración de la misión, los objetivos de calidad, auditorías de sistemas y productos, ensayos de fiabilidad en laboratorio internos, mejora continua).

<sup>13</sup> Draft Biomonitoring Report, Michael L. Fischman, M.D. September 25, 2012

- ISO 14001:2004 Medioambiental (reciclaje de residuos, prevención de la contaminación y el tratamiento de aguas residuales).
- OHSAS 18001:2007 de Seguridad y Salud en el trabajo (programas de salud y seguridad integrales para promover que "la seguridad es lo primero" y la participación activa a través de equipos de seguridad).

First Solar se caracteriza por ser muy activo en el desarrollo y mejora de sus programas de seguridad, fomentando la participación de los empleados de la línea de producción, así como de los directivos.

## **2.1.5.- ANÁLISIS DE LOS SUBPRODUCTOS PROCEDENTES DE PRODUCCIÓN**

Durante la fabricación de los módulos y procesos de reciclaje, los principales subproductos generados son: polvo, humos y aguas residuales que contienen cadmio, telurio y teluro de cadmio. El tratamiento de estos subproductos produce tres tipos diferentes de residuos: aire evacuado al medio ambiente, aguas residuales y residuos sólidos.

Utilizando el balance de masa del cadmio para cuantificarlos flujos de cadmio en los procesos de fabricación, se demuestra que el 66% del cadmio total es empleado en los módulos fotovoltaicos de CdTe, el 25% se corresponde con módulos reciclados, el 9% son residuos no especificados, el 0,02% se emite al agua y el 0,0001% corresponde a las emisiones al aire<sup>14</sup>.

### **2.1.5.1.- Emisiones al aire**

Tal como se describió anteriormente, First Solar tiene un sistema de control de filtros HEPA de última generación que permite que solamente el 0,0001% del cadmio sea emitido al aire. De hecho, el aire extraído y tratado se inyecta de nuevo en el sistema de ventilación de la fábrica. First Solar estima en menos de 6 g/año las emisiones totales de cadmio al aire en una fábrica de 100 MW/año.

Según los datos de 2010 publicados por First Solar, las emisiones de cadmio al aire en Estados Unidos en forma de CdTe representaron  $5,34 \times 10^{-9}$  kg por m<sup>2</sup> de módulo<sup>15</sup>. Estas emisiones al aire cumplen con los límites de emisión permitidos. Con respecto a la fábrica de Kulimen Malasia, una medición llevada a cabo por NM Laboratory Sdn. Bhd reveló que las impurezas del aire y la concentración de partículas sólidas emitidas por las chimeneas del edificio KLM5 el 05 de marzo 2013 no superaba el límite estándar "C" de calidad ambiental (aire limpio), definido en el Reglamento 1978, Parte V, n° 27 y n° 25.

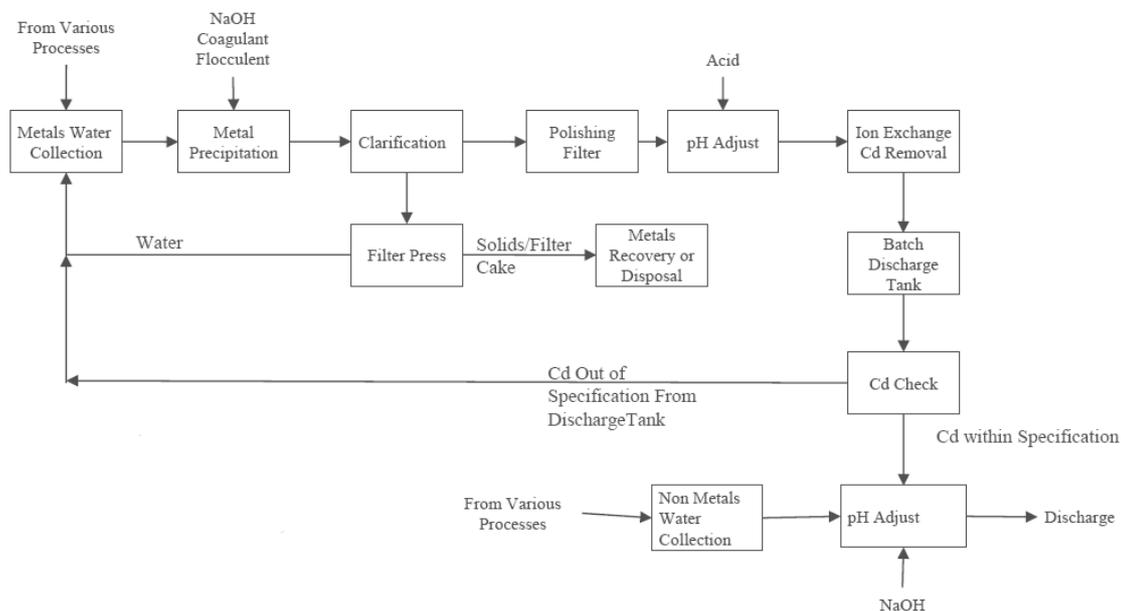
---

<sup>14</sup> Datos de First Solar

<sup>15</sup> N. Jungbluth, M. Stucki, K. Fluri, "Life cycle inventories of photovoltaics", 2012

### 2.1.5.2.- Emisiones al agua

El diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales de First Solar incluye operaciones tales como precipitación de metales, filtración e intercambio iónico (véase la Figura 9). Además de eso, se comprueba continuamente el contenido de Cd del agua que va a ser vertida y, si se encuentra fuera de especificaciones, el agua residual se re-circula de nuevo por el sistema de tratamiento de aguas residuales. Estos procesos reducen los niveles de Cd en las aguas residuales por debajo de 20 ppb (el valor típico es de 10 ppb) en las instalaciones de Malasia de First Solar.



**Figura 9** Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales

En cuanto a las aguas residuales, el balance de masa de First Solar para el cadmio indica que menos del 0,02% de la entrada total de cadmio se libera al agua.

Según datos de 2010 publicados por First Solar, las emisiones de Cd al agua en forma de  $Cd^{2+}$  fueron de  $4,43 \times 10^{-7}$  kg por  $m^2$  de módulo<sup>15</sup>. Los datos de la fábrica de Kulim en el año 2012 confirmaron que la cantidad de Cd liberado a las aguas residuales por MWp fue menor de 1,4 g. En este sentido, los datos correspondientes a 2012 del rendimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las plantas de First Solar, tanto en Malasia como en Perrysburg, revelaron que la concentración de Cd vertido no excedió los límites establecidos por la regulación local<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Documentación de First Solar

### **2.1.5.3.- Otros desechos sólidos**

Durante las operaciones de fabricación, se generan también otros residuos sólidos que incluyen: filtros HEPA usados, residuos de las operaciones de mantenimiento, resinas de intercambio iónico, etc. Estos residuos representan el 9% del total del cadmio entrante. Los filtros HEPA de las dos fábricas son enviados a terceras empresas para su eliminación como residuos peligrosos. Las resinas de intercambio iónico permanecen dentro del sistema ya que son regeneradas y se pueden utilizar de nuevo.

Además, en la planta de Perrysburg, First Solar está desarrollando con otras empresas el reciclaje del polvo del proceso de láser que, de acuerdo a la información proporcionada por First Solar, están certificadas de acuerdo a las normas ISO 9001 e ISO 14001.

No se ha profundizado más en el análisis referente a Medio Ambiente, Salud y Seguridad (Environment, Health and Safety, EHS) en la cadena de suministro de First Solar debido a la falta de información sobre las compañías suministradoras.

### **2.1.5.4.- Sustentabilidad**

First Solar ha establecido una Junta Directiva multidisciplinaria de Sustentabilidad para llevar a cabo las iniciativas relacionadas con estas actividades. Estas iniciativas se centran en la reducción de la huella de carbono y del consumo de energía, la gestión de proveedores, la participación comunitaria, el uso responsable de la tierra y el rendimiento general del negocio.

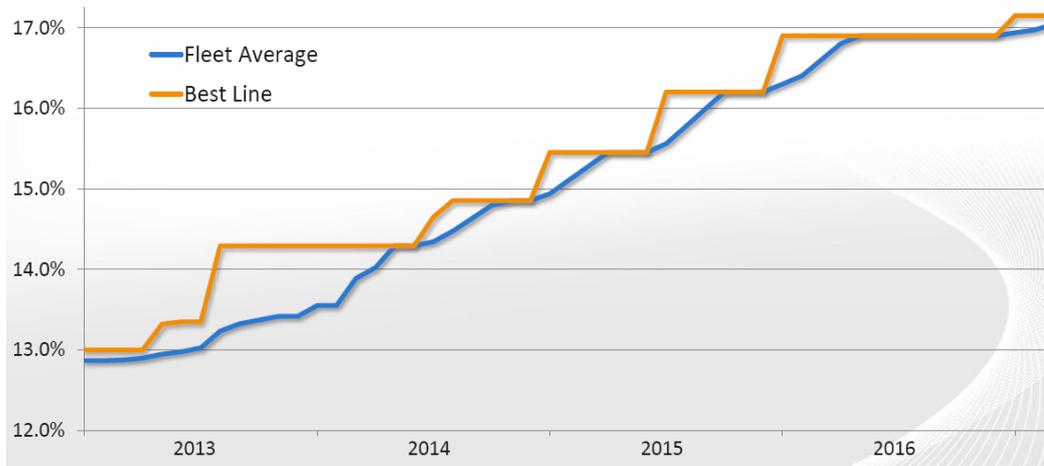
First Solar ha compartido algunas de las métricas que utiliza y que muestran los esfuerzos realizados con el fin de reducir la cantidad de subproductos emitidos por sus fábricas:

- El consumo de agua por vatio producido disminuyó en más de un 13% entre 2009 (1,9 L/vatio producido) y 2012 (1,64 L/vatio producido) mediante iniciativas de preservación del agua, proyectos de reutilización y la mejora de la eficiencia del módulo.
- La generación de residuos por vatio producido ha disminuido en aproximadamente un 50% entre 2009 (35,1 g/vatio producido) y 2012 (19,1 g/vatio producido) como resultado de mejoras en los procesos de tratamiento de las aguas residuales.

En general, de todo el material que First Solar envía fuera de sus instalaciones, el 83% se envía para una reutilización beneficiosa y no a vertederos. Estas mejoras han venido acompañadas por una reducción en el consumo de energía por vatio producido y en las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que el impacto ambiental de First Solar está avanzando hacia un perfil mucho más “verde”.

Mención especial debe hacerse a la mejora continua de la tecnología de First Solar durante los últimos años que ha conducido a un aumento significativo de la eficiencia de sus módulos. Siguiendo esta tendencia, se espera que la eficiencia de los módulos de First Solar continúe aumentando en el futuro próximo (véase la Figura 10). Esta evolución, además de aumentar la competitividad de los módulos fotovoltaicos de CdTe, mejorará los indicadores de

sustentabilidad anteriormente mencionados.



**Figura 10** Hoja de ruta de la eficiencia de los módulos de CdTe de First Solar

## 2.2.- ASPECTOS DE CICLO DE VIDA DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE CdTe DE FIRST SOLAR

Los aspectos de ciclo de vida de la tecnología fotovoltaica de CdTe usada por First Solar serán revisados en la presente sección y puestos en contextos al ser comparados con otras fuentes de generación eléctrica. Entre los aspectos incluidos en el análisis se incluyen el Tiempo de Retorno Energético (*Energy Payback Time* o EPBT), emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones atmosféricas de Cd, disponibilidad de telurio, uso de agua, impacto a la biodiversidad, uso de suelos y costes externos.

### 2.2.1.- TIEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO (EPBT)

El tiempo de retorno energético es uno de los indicadores más usados para evaluar el desempeño energético de los sistemas FV<sup>17</sup>. Se define como “el período requerido para un sistema de energía renovable para generar la misma cantidad de energía (en términos de energía primaria) que fue usada para producir el sistema en si”. Éste se calcula de la siguiente manera<sup>18</sup>:

$$EPBT = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL}}{\left( \frac{E_{agen}}{\eta_G} \right) - E_{O\&M}}$$

Donde cada término significa

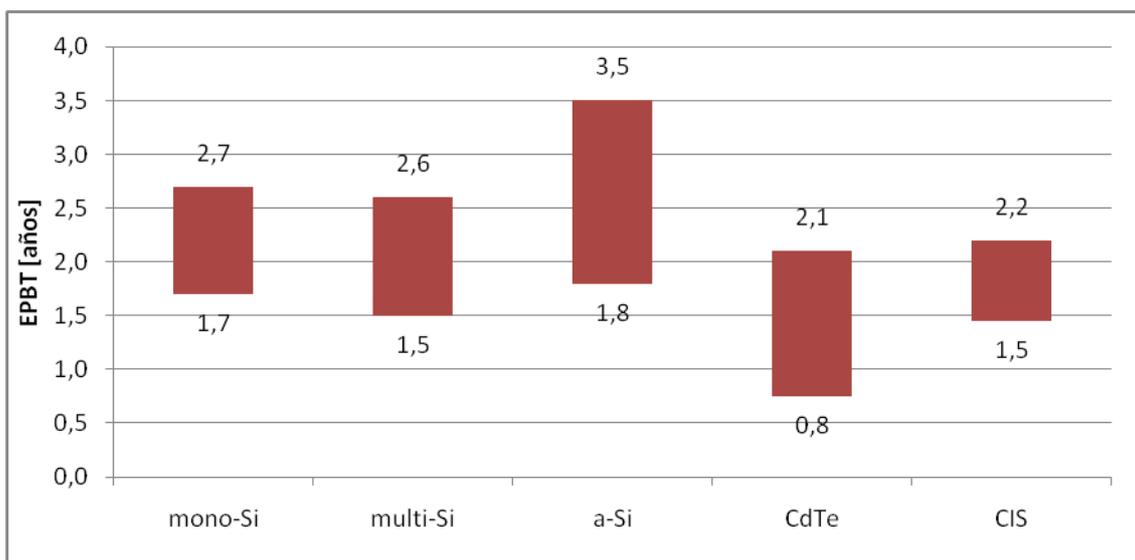
$E_{mat}$	Demanda de energía primaria para producir los diversos materiales del Sistema FV
$E_{manuf}$	Demanda de energía primaria para producir el Sistema FV
$E_{trans}$	Demanda energética primaria para transportar los materiales usados durante el ciclo de vida
$E_{inst}$	Demanda de energía primaria para instalar el sistema
$E_{EOL}$	Demanda de energía primaria para la gestión de fin de vida
$E_{agen}$	Generación eléctrica anual
$E_{O\&M}$	Demanda energética primaria para la operación y mantenimiento
$\eta_G$	Eficiencia de la red, el promedio de eficiencia de conversión de energía primaria a electricidad por el lado de la demanda.

Peng et al. revisaron los EPBTs publicados para diferentes sistemas FV. La Figura 11 presenta los EPBTs publicados en dicho estudio, estandarizados para una irradiación de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año. Para la tecnología CdTe, se encontró un rango de 0,8 a 2,1 años para el EBPT,

<sup>17</sup>Peng, J., Lu, L., & Yang, H. 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 255-274.

<sup>18</sup>Fthenakis, V., et al. 2011. Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity. IEA PVPS Task 12.

constituyéndose en el rango más bajo dentro de las tecnologías estudiadas.



**Figura 11** Tiempo de Retorno Energético [años] para diferentes tecnologías FV. Irradiación estandarizada en 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año. Adaptado de Peng et al., 2013

El EPBT fue calculado para el despliegue de módulos de First Solar en las condiciones del norte de Chile para 2 ubicaciones: Crucero y Carrera. La locación Crucero se encuentra conectada al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), mientras que la locación Carrera se encuentra conectado al Sistema Interconectado Central (SIC). La Tabla 1 muestra los datos de radiación solar para las locaciones estudiadas. Éstos fueron obtenidos del sitio web de Solar Explorer, perteneciente al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, considerando un promedio de 10 años (2003 – 2012), el cual fue consistente con mediciones in situ realizadas por First Solar durante el año 2012 (2626 y 2540 kWh/m<sup>2</sup>/año para los sitios de Crucero y Carrera, respectivamente). Un factor de corrección promedio de 1,12 fue usado para estimar la radiación de un arreglo de paneles con plano fijo de inclinación.

	Crucero	Carrera	Fuente
<b>Red Eléctrica</b>	SING	SIC	-
<b>Radiación global horizontal [kWh/m<sup>2</sup>/año]</b>	2537	2533	U. de Chile, 2012 <sup>19</sup>
<b>Radiación plano fijo de inclinación [kWh/m<sup>2</sup>/año]</b>	2841	2837	Usando un factor de corrección de 1,12 <sup>20</sup>

**Tabla 1** Datos de radiación para las dos posibles locaciones en el norte de Chile.

Los parámetros considerados para el cálculo del EPBT son mostrados en la Tabla 2. Se usó un valor de 1270 MJ/m<sup>2</sup> para la Demanda Acumulada de Energía (CED por sus siglas en inglés)<sup>21</sup>.

<sup>19</sup>Universidad de Chile, 2012. Explorador solar. <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>

<sup>20</sup>First Solar, 2012. Technical report: Estimating Carbon Displacement by Solar Deployment.

<sup>21</sup>Held, M., & Ilg, R. 2011. Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19(5), 614-626.

Este valor incluye la producción de los materiales, manufactura de los módulos, instalación, balance del sistema (*Balance of System* o BOS) montado sobre suelo y reciclaje al fin de la vida útil (*End-of-Life* o EOL). Se usó una eficiencia del módulo de 12,7%, reportada por First Solar para el desempeño promedio de éstos el 2012. Finalmente, las eficiencias de las redes eléctricas para el SIC y SING fueron calculadas. Se obtuvo un 29% para el SING y un 43% para el SIC. La principal diferencia en éstos radica en un alto consumo de combustibles fósiles en el SING (98% de combustibles fósiles como energía primaria) versus el SIC (52% de combustibles fósiles como energía primaria). Los detalles de la composición de ambas redes pueden ser encontradas en el Anexo 3.1.

Parámetro	Valor	Fuente
<b>CED del Sistema FV CdTe [MJ/m<sup>2</sup>]<sup>22</sup></b>	1270	Held & Ilg, 2011
<b>Eficiencia del módulo [%]</b>	12,7	First Solar (promedio 2012)
<b>Factor de desempeño</b>	0,8	Fthenakis et al., 2011
<b>Vida útil (años)</b>	30	Held & Ilg, 2011
<b>Tasa de degradación (%/año)</b>	0,7	Held & Ilg, 2011
<b>Eficiencia de la red SING (%)</b>	29	Este estudio
<b>Eficiencia de la red SIC (%)</b>	43	Este estudio

**Tabla 2** Parámetros usados para el calculado del EPBT

Como la información anterior no incluye valores de transporte (km y CED), se estimaron las distancias del puerto más cercano al lugar de producción hasta el puerto de Antofagasta en flete marítimo, desde Antofagasta hasta el punto de instalación en camión y desde el puerto de Antofagasta hasta el puerto más cercano al reciclaje al fin de la vida útil.

La Tabla 3 muestra las distancias y CED relevantes para el estudio.

<sup>22</sup>Valores incluyen producción de materiales, instalación, balance del sistema (BOS) y reciclaje de fin-de-vida (EOL). No incluye el transporte de los paneles al sitio de instalación, ni del sitio de instalación al reciclaje al fin de la vida útil.

<b>Transporte</b>	<b>Distancia [km]</b>	<b>Vehicle</b>	<b>CED [MJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fuente</b>
<b>Envío panel solar (Penang, Malasia a Terminal de Antofagasta, Chile)</b>	19863	Flete marítimo	55	Distancia: Searates CED: Ecoinvent
<b>Envío al reciclaje de fin-de-vida (Terminal de Antofagasta, Chile a Terminal de Hamburgo, Alemania)</b>	13586	Flete marítimo	38	Distancia: Searates CED: Ecoinvent
<b>Envío de panel solar o reciclaje de fin-de-vida (Terminal de Antofagasta, Chile a Terminal de Detroit, USA)</b>	11155	Flete marítimo	31	Distancia: Searates CED: Ecoinvent
<b>Envío de panel solar o reciclaje de fin-de-vida (Terminal de Antofagasta, Chile a Crucero, Chile)</b>	217	Camión (EURO 3)	11	Distancia: Google Maps CED: Ecoinvent
<b>Envío de panel solar o reciclaje de fin-de-vida (Terminal de Antofagasta, Chile a Carrera, Chile)</b>	637	Camión (EURO 3)	33	Distancia: Google Maps CED: Ecoinvent

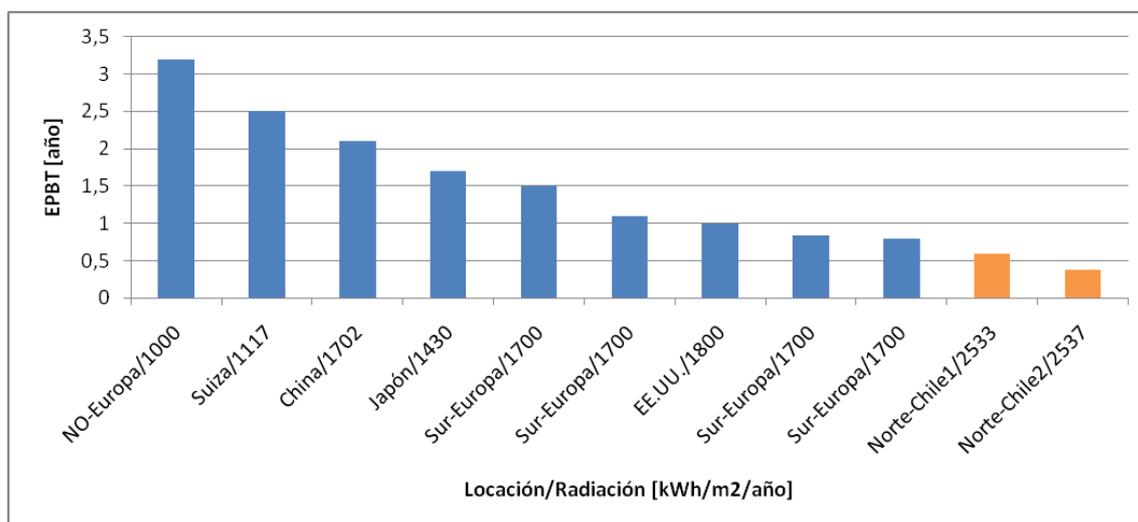
**Tabla 3** Información de distancias de transporte y CED para el cálculo del EPBT

La Tabla 4 muestra los resultados de los cálculos de EPBT para los 4 escenarios analizados, considerando los diferentes sitios de producción y reciclaje al fin de la vida útil. Se puede observar que los EPBT son más bajos que los revisados en otros estudios, debido a la alta radiación solar en los sitios del norte de Chile. También se puede notar el EPBT conectado al SING es significativamente menor que conectado al SIC, debido al efecto de desplazar una mayor proporción de combustibles fósiles. Finalmente, cabe destacar que la distribución y recolección de paneles, la cual no es considerada en estudios de análisis de ciclo de vida, representa hasta el 13% del CED para los casos estudiados.

	<b>Crucero (SING/Panel de MY/EOL GE)</b>	<b>Crucero (SING/Panel de EEUU/EOL US)</b>	<b>Carrera (SIC/Panel de MY/EOL GE)</b>	<b>Carrera (SIC/Panel de EEUU/EOL US)</b>
<b>CED “Cuna a reciclaje” [MJ/m<sup>2</sup>]</b>	1386	1355	1430	1399
<b>Radiación [kWh/m<sup>2</sup>/año]</b>	2841	2841	2837	2837
<b>EPBT [año]</b>	<b>0,39</b>	<b>0,38</b>	<b>0,60</b>	<b>0,59</b>

**Tabla 4** EBPT (año) para los cuatro escenarios.

La Figura 12 muestra los resultados de este estudio en comparación a diferentes sistemas fotovoltaicos de CdTe y radiaciones encontradas en la literatura. Se muestran los peores casos analizados para ambas locaciones en el norte de Chile, donde Norte-Chile1 corresponde a Carrera y Norte-Chile2 corresponde a Crucero. Más detalles sobre estos estudios pueden ser encontrados en el Anexo 3.2.

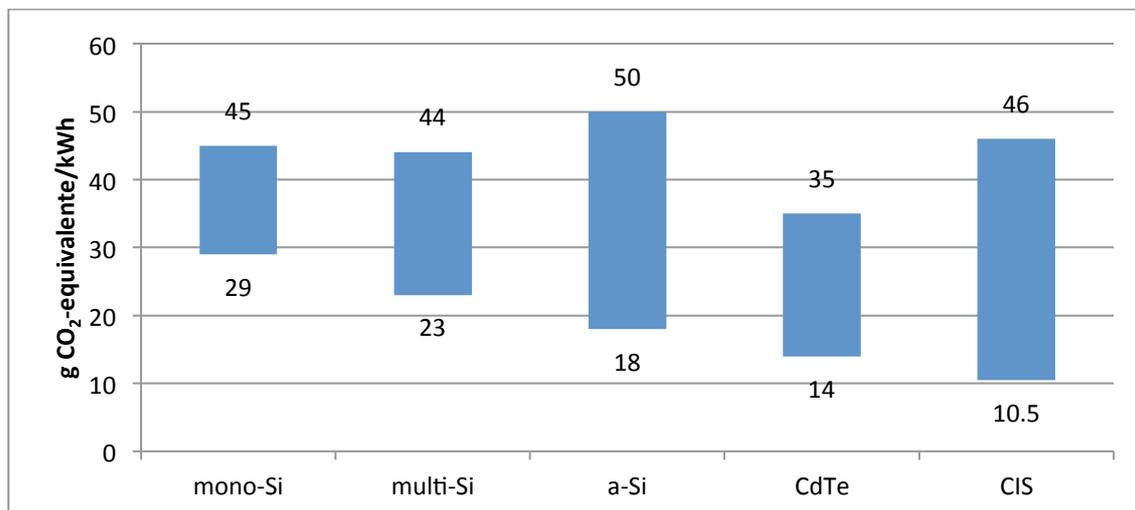


**Figura 12** Tiempo de Retorno Energético (EPBT) [año] para diferentes sistemas fotovoltaicos de CdTe y radiaciones. Fuentes: Peng et al., 2013; este estudio.

## 2.2.2.- EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

En la actualidad, es ampliamente aceptado que la cantidad de gramos de CO<sub>2</sub>-equivalente es un buen indicador para realizar comparaciones del grado de contaminación asociado con los diversos métodos de generación eléctrica.

La Figura 13 muestra el rango de emisiones de GEI para distintas tecnologías FV, estandarizadas para una irradiación de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año<sup>23</sup>. Como se puede observar, las tecnologías fotovoltaicas de CdTe se presentan entre las con menores rangos de emisiones de GEI entre las estudiadas.



**Figura 13** Emisiones de GEI para diferentes tecnologías FV. Radiación estandarizada en 1700 [kWh/m<sup>2</sup>/año]. Adaptado de Peng et al., 2013

Para el cálculo de las emisiones de GEI de los sistemas (o GWP por sus siglas en inglés), se utilizó la siguiente fórmula:

$$GWP \text{ Cuna a Reciclaje} = \frac{GWP \text{ sistema FV} - CdTe + GWP \text{ Transporte}}{I \cdot \eta_{PV} \cdot PR \cdot L_t \cdot \left(1 - \frac{D_r}{2}\right)}$$

Donde las variables se definen como:

- $I$  Radiación [kWh/m<sup>2</sup>/año]
- $\eta_{PV}$  Eficiencia Panel [%]
- $PR$  Factor de desempeño [%]
- $L_t$  Vida útil [año]
- $D_r$  Tasa de degradación [%/año]

Las emisiones de GEI fueron calculadas para el despliegue de los módulos de First Solar bajo las condiciones del norte de Chile. La Tabla 5 muestra la información y fuentes usados para estos cálculos.

<sup>23</sup>Peng, J., Lu, L., & Yang, H. 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 255-274

	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Fuente</b>
<b>GWP Sistema FV-CdTe</b>	86,1	Held and Ilg (2011).
<b>Envío panel solar (Penang, Malasia a Terminal Antofagasta, Chile)</b>	3,82	Ecoinvent
<b>Envío a reciclaje de fin de vida (Terminal de Antofagasta, Chile a Terminal Hamburgo, Alemania)</b>	2,61	Ecoinvent
<b>Envío panel solar o envío a reciclaje de fin de vida (Terminal Antofagasta, Chile a Terminal Detroit, EEUU)</b>	2,14	Ecoinvent
<b>Envío panel solar o envío a reciclaje de fin de vida (Terminal Antofagasta, Chile a Crucero, Chile)</b>	0,74	Ecoinvent
<b>Solar Panel Deliver or EOL recycling (Terminal Antofagasta, Chile a Carrera, Chile)</b>	2,16	Ecoinvent

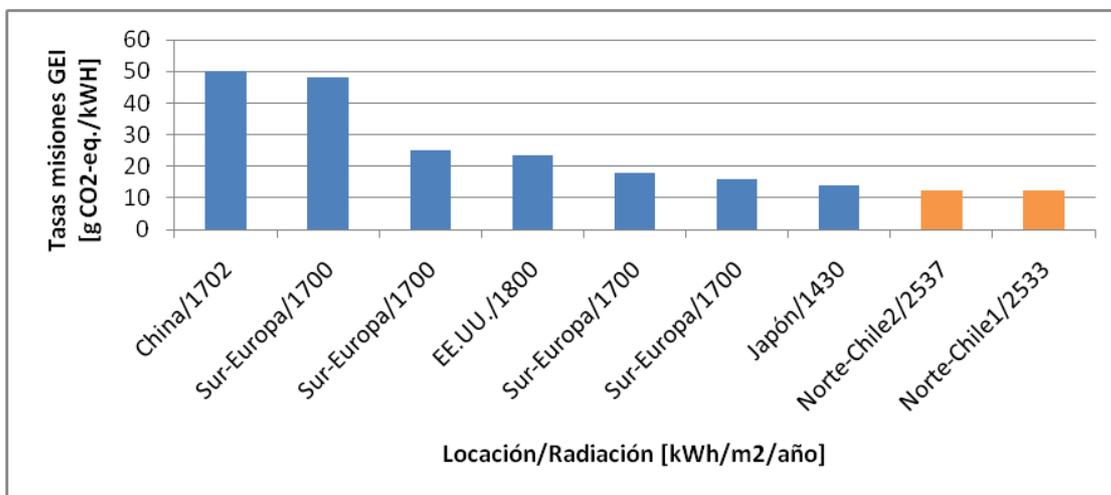
**Tabla 5** Emisiones GEI [g CO<sub>2</sub>-eq./kWh] para sistemas fotovoltaicos de CdTe y distintos escenarios de transporte

Usando la información presentadas desde la Tabla 1 hasta la Tabla 5, se calcularon las emisiones de GEI para los distintos sistemas analizados y son presentados en la Tabla 6. Para todos los escenarios considerados, las emisiones de GEI del sistema de CdTe es aproximadamente 12 g CO<sub>2</sub> eq./kWh.

	<b>Crucero (SING/Panel de MY/EOL GE)</b>	<b>Crucero (SING/Panel de EEUU/EOL EEUU)</b>	<b>Carrera (SIC/Panel de MY/EOL GE)</b>	<b>Carrera (SIC/Panel de US/EOL US)</b>
<b>GWP Cuna a Reciclaje [kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>]</b>	94,00	91,85	95,56	94,70
<b>Irradiación [kWh/m<sup>2</sup>/año]</b>	2841	2841	2837	2837
<b>Total energía producida [kWh]</b>	7795	7795	7782	7782
<b>GWP [g CO<sub>2</sub> eq/kWh]</b>	<b>12,1</b>	<b>12,3</b>	<b>11,8</b>	<b>12,2</b>

**Tabla 6** Emisiones GEI [g CO<sub>2</sub>-eq./kWh] para los 4 escenarios analizados

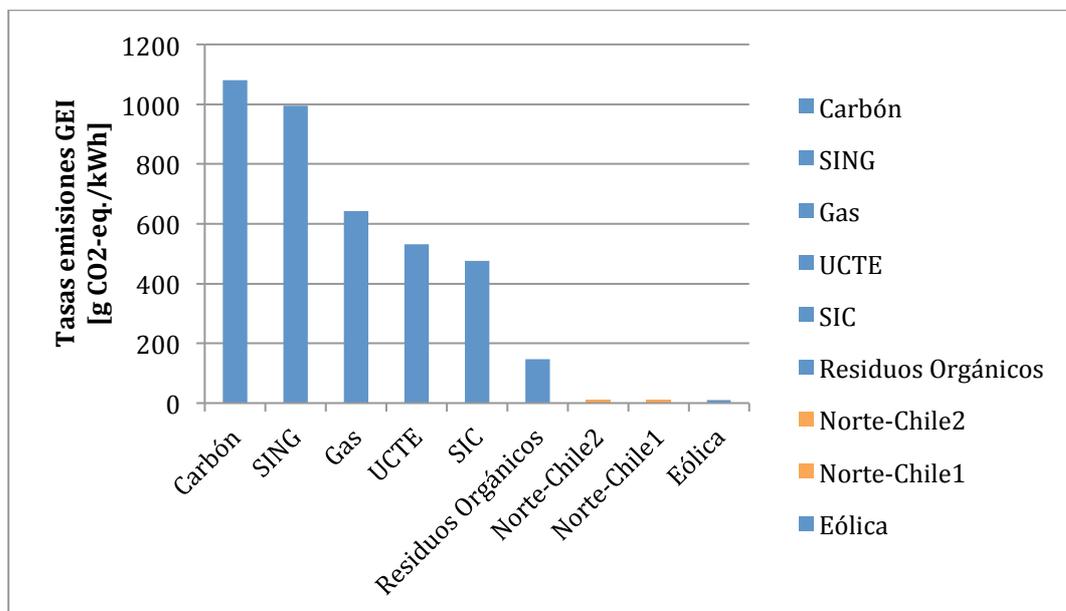
La Figura 14 muestra estos resultados en comparación con los resultados publicados para diferentes tecnologías FV CdTe y radiaciones.<sup>24</sup>



**Figura 14** Emisiones GEI [g CO2-eq./kWh] para diferentes sistemas fotovoltaicos de CdTe y radiaciones<sup>25</sup>.

Puede observarse nuevamente que el sistema fotovoltaico bajo estudio obtuvo las emisiones de GEI más bajas en ambas locaciones, debido a la alta radiación solar en estos sitios.

La Figura 15 muestra las emisiones de GEI para diferentes fuentes de generación eléctrica, destacándose el presente sistema estudiado como uno con las menores tasas de emisión, siendo un 97% y 99% menor que el SIC y SING respectivamente para cada locación.<sup>26</sup>



**Figura 15** Emisiones GEI [g CO2-eq./kWh] para diferentes fuentes de energía eléctrica.

<sup>24</sup>Véase Anexo 3.2 para más detalles

<sup>25</sup>Peng, J., Lu, L., & Yang, H. 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 255-274

<sup>26</sup>Tasas de emisión obtenidas de procesos de Ecoinvent. Para más detalles ver Anexo 3.3

### 2.2.3.- EMISIONES DE CADMIO EN EL CICLO DE VIDA

El cadmio (Cd) es un metal altamente tóxico y debido a que los módulos fotovoltaicos de CdTe contienen compuestos de Cd, existen preocupaciones respecto al rol que la amplia adopción de esta tecnología pudiera jugar en aumentar la contaminación por Cd. En esta sección se hace una revisión de las emisiones de cadmio al medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de los módulos de CdTe, poniéndolas en el contexto de otras tecnologías de generación eléctrica.

Fthenakis<sup>27</sup> estudió en detalle las emisiones atmosféricas de Cd relacionadas a la minería y procesamiento de minerales de Zn (desde donde se obtiene el Cd), purificación de Cd, producción del compuesto CdTe y la manufactura, operación y manejo de fin de la vida útil de los módulos de CdTe. Encontró que las emisiones atmosféricas totales iban desde los 19 mg Cd/GWh (escenario de referencia) hasta os 67 mg Cd/GWh (escenario pesimista), considerando la radiación solar promedio de los EE.UU. de 1800 kWh/m<sup>2</sup>/año. Tal como se discutirá en la Sección 2.3, el riesgo de contaminación por Cd durante la operación de módulos de CdTe es baja, dado que es estable bajo condiciones esperables de operación o potenciales accidentes. Por lo tanto, se considera que no existen emisiones de Cd durante la fase de operación.

Raugei y Fthenakis<sup>28</sup> estimaron las emisiones atmosféricas totales de la fabricación (incluyendo emisiones aguas arriba) en 1,3 mg Cd/m<sup>2</sup> de módulo, notando que la mayor parte de esas emisiones están relacionadas a componentes que son comunes a distintas tecnologías fotovoltaicas, incluyendo vidrio templado, material laminado y óxidos constructores transparentes.

Las emisiones atmosféricas de Cd del proceso de reciclaje de módulos de First Solar, incluyendo la refinación del material semiconductor realizada por sus proveedores, han sido calculadas por Sinha et al.<sup>29</sup> como inferiores a 0,006 mg Cd/m<sup>2</sup> de módulo.

Estos datos fueron utilizados para calcular el potencial de emisiones atmosféricas de Cd durante el ciclo de vida de los módulos de CdTe. Se consideró una producción total de energía de 7788,5 kWh/m<sup>2</sup>, para una vida útil de 30 años y la radiación solar promedio entre los sitios Crucero y Carrera. Para la minería, fundición y refinación de minerales de Zn, se consideró el factor de asignación económica de 0,58% para el Cd utilizado por Fthenakis (asignación de emisiones a la co-producción de Zn, Cd, Ge e In).

---

<sup>27</sup>Fthenakis V.M., "Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe Photovoltaic Production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 303-334, 2004.

<sup>28</sup>Raugei, M., and V. Fthenakis., *Cadmium flows and emissions from CdTe PV: future expectations*, *Energy Policy*, 38 (9), 5223-5228 (2010).

<sup>29</sup>Sinha, P., M. Cossette, and J.-F. Ménard. 2012. *End-of-life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining*. Proceedings : 27th EU PVSEC, Frankfurt, Germany, pp. 4653 – 4656.

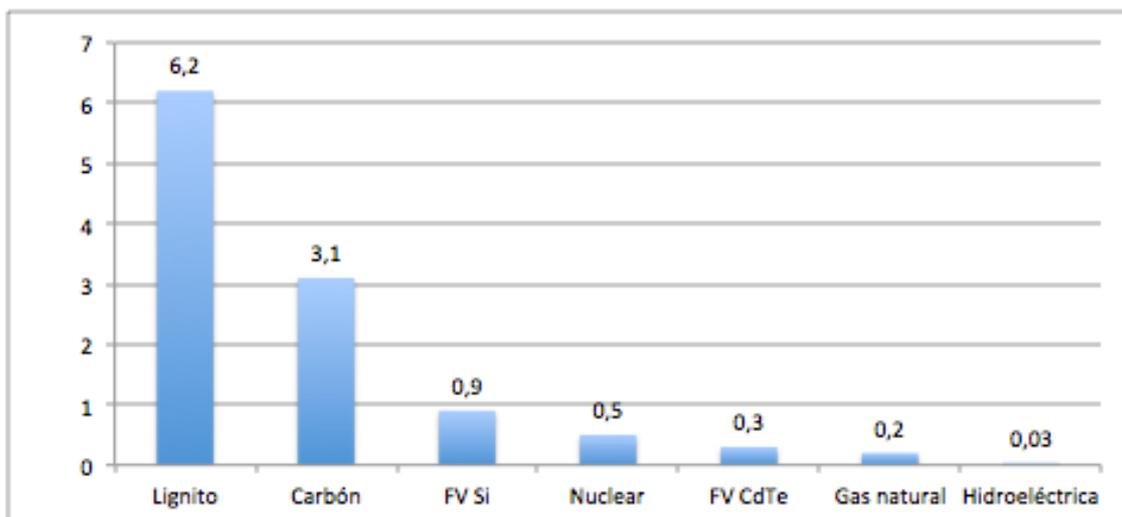
Actividad del ciclo de vida	Emisiones (mg Cd/m <sup>2</sup> módulo)	Emisiones (mg Cd/GWh)	Fuente
<b>Minería de Zn</b>	0,0001	0,01	Fthenakis, 2004
<b>Fundición/refinación de Zn</b>	0,0016	0,21	Fthenakis, 2004
<b>Purificación de Cd</b>	0,042	5,39	Fthenakis, 2004
<b>Producción de CdTe</b>	0,042	5,39	Fthenakis, 2004
<b>Fabricación de módulos FV de CdTe</b>	0,021	2,70	Fthenakis, 2004
<b>Otros componentes de los módulos</b>	1,19	153	Raugei & Fthenakis, 2010
<b>Balance del sistema (BOS)</b>	0,4	51	Raugei & Fthenakis, 2010
<b>Operación de los módulos</b>	0	0,00	Fthenakis, 2004
<b>Reciclaje</b>	0,0059	0,76	Sinha et al., 2012
<b>Total</b>	<b>1,71</b>	<b>219</b>	-

**Tabla 7** Emisiones atmosféricas de Cd del ciclo de vida de módulos FV de CdTe, radiación solar del norte de Chile

La Tabla 7 muestra los resultados de estos cálculos, resultando un total de 219 mg Cd/GWh producido bajo las condiciones de radiación solar del norte de Chile.

Cuando se comparan con otras fuentes de generación eléctrica, las emisiones atmosféricas de Cd desde los módulos de CdTe, según estimaciones de Fthenakis et al.<sup>30</sup>, son menores que las de alternativas tales como otras tecnologías fotovoltaicas, carbón, petróleo y nuclear; y mayores que las de gas natural o hidroelectricidad, como se muestra en la Figura 16. Específicamente cuando se comparan con plantas termoeléctricas a carbón con dispositivos de control de partículas, los autores determinaron que las emisiones de sistemas fotovoltaicos de CdTe montados sobre suelo serían entre 90 y 300 veces menores.

<sup>30</sup>Fthenakis, V.M., Kim H.C., & Alsema, E. 2008. "Emissions from Photovoltaic Life Cycles," *Environmental Science and Technology*, 42, 6 (2008).



**Figura 16** Emisiones atmosféricas de Cd de ciclo de vida para distintas opciones de generación eléctrica.

Fuente: Fthenakis et al., 2008

El motivo por el cual las emisiones de Cd desde los módulos de CdTe son menores que para otros sistemas fotovoltaicos, tales como módulos cristalinos de silicio, es el menor consumo energético requerido para la fabricación de los módulos de CdTe. Esto también se traduce en menores emisiones de ciclo de vida de otros contaminantes, incluyendo arsénico, cromo, plomo, mercurio, níquel, So, NOx, material particulado y gases de efecto invernadero.<sup>31</sup>

El uso de Cd en baterías de NiCd y la generación eléctrica en base a carbón son fuentes mayores de emisión de Cd que los módulos de CdTe.<sup>32</sup> Se espera que las emisiones de Cd desde módulos de CdTe en el futuro (2025 y 2050) sean órdenes de magnitud inferiores que las actuales emisiones de este metal en Europa. Por lo tanto, el desplazamiento de electricidad generada a partir de combustibles fósiles y el secuestro de Cd en una forma estable tendrían impactos positivos sobre el medio ambiente.<sup>33</sup>

## 2.2.4.- DISPONIBILIDAD DE TELURIO

Con la creciente adopción de la tecnología de CdTe para plantas solares de gran escala, se ha evaluado la escasez de telurio (Te) como un potencial factor limitante para el crecimiento de esta tecnología. Actualmente, el Te se obtiene como un sub-producto de la refinación de cobre.

De acuerdo a Zweibel<sup>34</sup>, la cantidad de Te requerida para la fabricación de módulos fotovoltaicos de CdTe es de 91 t/GW. Se espera que debido a un alza en la demanda por Te

<sup>31</sup>Fthenakis, V.M., Kim H.C., and Alsema, E. 2008. "Emissions from Photovoltaic Life Cycles," *Environmental Science and Technology*, 42, 6 (2008).

<sup>32</sup>Fthenakis V.M., "Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe Photovoltaic Production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 303-334, 2004.

<sup>33</sup>Raugei, M., and V. Fthenakis., Cadmium flows and emissions from CdTe PV: future expectations, *Energy Policy*, 38 (9), 5223-5228 (2010).

<sup>34</sup>Zweibel, K. 2010. The Impact of Tellurium Supply on Cadmium Telluride Photovoltaics. *Science*, Vol. 328: 699-701.

desde la industria de CdTe, los precios del Te subirían, lo que en consecuencia resultaría en una mayor recuperación de Te desde la refinación de cobre y, posiblemente, a la recuperación de Te desde la refinación de otros metales como oro, zinc y plomo. También se han identificado algunas fuentes de Te como mineral principal, las que podrían comenzar a explotarse. Actualmente, los aumentos en la producción global de Te están acoplados a los aumentos en la producción de cobre, entre 1% y 3% anual. Adicionalmente al aumento en la oferta de Te, la demanda por unidad de electricidad generada puede ser reducida mediante avances continuos en la tecnología de los módulos de CdTe, tales como la reducción del grosor de la capa semiconductor y el aumento de la eficiencia de los módulos. Teniendo en cuenta estas consideraciones, Zweibel concluye que las proyecciones del potencial de generación fotovoltaica a partir de módulos de CdTe basados en una disponibilidad casi estática de Te para los próximos 20 años constituyen subestimaciones significativas.

Marwede y Reller<sup>35</sup> estudiaron el potencial efecto del reciclaje de módulos de CdTe en la disponibilidad de Te para la industria fotovoltaica, a través de un análisis de flujo de materiales. Generaron tres escenarios (“avance acelerado”, avance sostenido” y “progreso lento”), considerando distintos supuestos en el uso de materiales, vida útil de los módulos y tasas de reciclaje (tanto al fin de la vida útil como desde los procesos de fabricación). Concluyeron que para el año 2038 la demanda de Te para módulos de CdTe podría ser satisfecha íntegramente por material reciclado desde módulos si se logran mejoras sustanciales en la eficiencia del uso de Te y se establecen sistemas efectivos de recolección y reciclaje (escenario “avance acelerado”).

Considerando estos escenarios, la demanda por Te como insumo desde fuentes primarias llegaría a su máximo entre los años 2021 y 2024 y, bajo condiciones factibles, no debiera enfrentar escasez de oferta. El reciclaje de módulos de CdTe es esencial para conservar el escaso Te y, adicionalmente, para asegurar el evitar emisiones de Cd al medio ambiente. Esto será impulsado tanto por la factibilidad económica de la recolección y reciclaje de módulos como por medidas regulatorias, tales como programas de responsabilidad del productor.

Fthenakis<sup>36</sup> proyectó escenarios de aumentos en la disponibilidad de Te, mejoras en la eficiencia de los módulos, reducciones en el grosor de la capa semiconductor y recuperación de Te al fin de la vida útil de los módulos de CdTe. Concluyó que la disponibilidad de Te podría soportar una producción anual de 16-24 GW<sub>p</sub> en 2020, 44-106 GW<sub>p</sub> en 2050 y 60-161 GW<sub>p</sub> en 2075.

La Figura 17 resume las estrategias de gestión en distintas partes del ciclo de vida del producto que pueden contribuir a asegurar que el crecimiento de esta tecnología no se vea limitado por la disponibilidad de Te.

<sup>35</sup>Marwede, M. & A. Reller. 2012. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. *Resources, Conservation and Recycling* 69: 35– 49.

<sup>36</sup>Fthenakis V.M. 2012. Sustainability metrics for extending thin-film photovoltaics to terawatt levels. *MRS Bulletin*. Vol. 37: 425-430.



Figura 17 Estrategias de gestión de ciclo de vida para la disponibilidad de telurio.<sup>37</sup>

## 2.2.5.- USO DE AGUA

Además de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, la demanda por agua dulce para la generación de electricidad es un importante indicador de sustentabilidad para evaluar distintas tecnologías.

Es necesario hacer una distinción entre dos métricas relacionadas al uso de agua: abstracción de agua y consumo de agua. La primera se refiere al agua que es retirada de la naturaleza (desde ríos, lagos, acuíferos y arroyos). La segunda se refiere al agua que es “consumida” en un proceso (es decir, evaporada, transpirada o incorporada a un producto) y, por lo tanto, es removida de su ambiente acuático inmediato. El agua de mar comúnmente se excluye de estas métricas, dado que se considera ilimitada para efectos prácticos. La diferencia entre abstracción y consumo de agua se conoce como descarga de agua.<sup>38</sup> En general, existe una escasez de información respecto al consumo de agua, por lo que centramos la discusión en abstracción de agua.

Fthenakis y Kim<sup>39</sup> investigaron el uso de agua dulce para distintas tecnologías de generación eléctrica, renovables y convencionales, para un contexto de los EE.UU., basándose en estudio publicados y utilizando un enfoque de ciclo de vida. Cuantificaron la abstracción de agua para la manufactura de módulos de CdTe en 787,3 L/MWh, de los cuales 575 L se relacionan a procesos aguas arriba (materias primas para los módulos), 0,8 L/MWh a la fábrica de módulos y 211,5 al balance del sistema (basado en una radiación de 1800 kWh/m<sup>2</sup>/año, una vida útil de 30 años y un factor de desempeño de 0,8). El uso de agua durante la operación de una planta fotovoltaica de CdTe se considera como cero, dado que los módulos pueden ser limpiados en

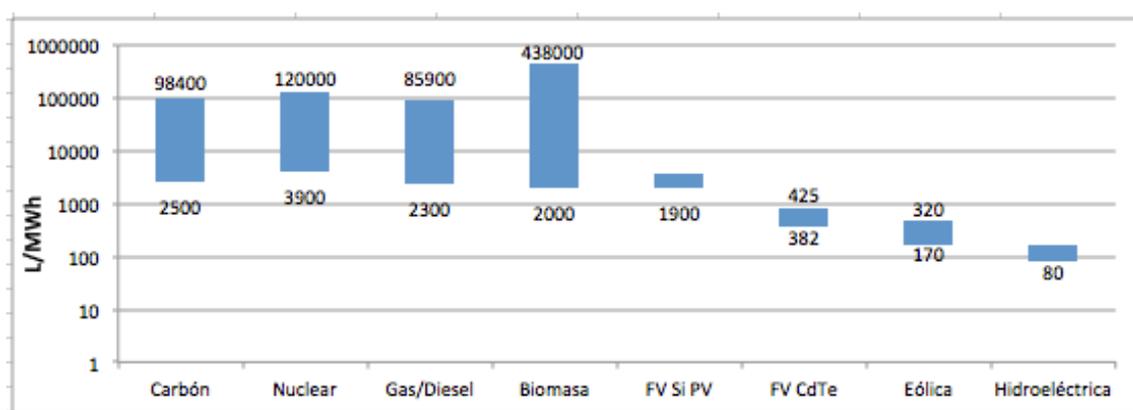
<sup>37</sup>Sinha, P. 2013. Life cycle materials and water management for CdTe photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 119, 271-275.

<sup>38</sup>Inhaber, H. 2004. Water Use in Renewable and Conventional Electricity Production. *Energy Sources*, 26(3), 309-322; Sinha, P., A. Meader, & M. de Wild-Scholten. 2013. Life Cycle Water Usage in CdTe Photovoltaics, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, Number 1, pp. 429-432.

<sup>39</sup>Fthenakis, V., & H. C. Kim. Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 14, pp. 2039-2048, 2010.

seco o no ser limpiados, dependiendo de las condiciones de precipitaciones y *soiling* del sitio. De hecho, First Solar recomienda no limpiar con agua para la mayor parte de las condiciones y han desarrollado un cepillo especial para el lavado en seco de los módulos cuando es requerido.

Como se muestra en la Figura 18 (en escala logarítmica), la abstracción de agua para energía fotovoltaica de CdTe es menor que para energía a partir de carbón, petróleo/gas, nuclear, biomasa y tecnologías fotovoltaicas de silicio. Entre las opciones comparadas, sólo la energía eólica y la hidroeléctrica tienen una menor demanda de agua (la abstracción de agua para generación hidroeléctrica fue asumida como cero por los autores, a pesar de que existe consumo de agua por evaporación). Los autores concluyeron que el migrar la generación energética hacia tecnologías renovables como la fotovoltaica y la eólica ofrecen la mejor opción para reducir la demanda hídrica del sector eléctrico.



**Figura 18** Abstracción de agua de ciclo de vida para distintas fuentes de generación eléctrica (Fuentes: Fthenakis and Kim, 2010; Sinha et al., 2013)

Recientemente se ha publicado un estudio sobre la abstracción de agua del ciclo de vida de los módulos de CdTe, considerando las fábricas de First Solar<sup>40</sup>. Las abstracciones totales van desde 382 a 425 L/MWh (la variabilidad se debe a dos escenarios distintos para la vida útil del balance del sistema, 60 y 30 años respectivamente). Aproximadamente un 12% de esto corresponde a uso directo de agua (incluyendo fabricación de paneles, preparación del sitio de la planta generación eléctrica y abatimiento de polvo durante la construcción) y el resto está incorporado en procesos aguas arriba y electricidad (aproximadamente un 48% se asocia a la fabricación de módulos, 28% a la fabricación del balance del sistema y 12% a la recolección y reciclaje de módulos).

El desplazamiento de generación eléctrica actual (considerando la matriz energética del suroeste de los EE.UU.) por la operación de una planta fotovoltaica de CdTe evitaría la

<sup>40</sup>Sinha, P., A. Meader, and M. de Wild-Scholten. 2013. Life Cycle Water Usage in CdTe Photovoltaics, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 3, Number 1, pp. 429-432.

---

abstracción de entre 1700 y 5600 L/MWh.

### **2.2.6.- USO DE SUELO Y BIODIVERSIDAD**

El potencial establecimiento masivo de plantas solares ha suscitado preocupaciones relacionadas a la superficie de suelo requerida y sus posibles efectos sobre la biodiversidad. Este es un tema que aún no es bien comprendido y donde se requiere mayor investigación. Esta sección discute algunas publicaciones relevantes sobre este asunto.

Turney y Fthenakis<sup>41</sup> revisaron la literatura disponible acerca de los impactos ambientales de la instalación y operación de plantas solares de gran escala. Incluyeron en su análisis aspectos relacionados a la intensidad de uso de suelo, vida silvestre, salud y bienestar humano, recursos geohidrológicos y cambio climático, considerando un total de 32 impactos. Comparados a la generación tradicional de energía en los EE.UU., se encontró que la energía solar sería beneficiosa para 22 de los 32 impactos considerados. Respecto a los otros 10 impactos, se considera que es neutral en 4 y para los otros 6 se requiere mayor investigación, mientras que no se encontraron impactos negativos relativo a las fuentes tradicionales de electricidad que la energía solar podría desplazar. Se señala que los impactos por kWh generado son más bajos en áreas con alta radiación solar, como los desiertos, debido a la mayor producción de energía por superficie utilizada. A continuación discutimos los impactos relacionados con uso de suelo y vida silvestre.

Desde una perspectiva de ciclo de vida, las plantas solares ocupan menos suelo que la generación a carbón (incluyendo minería superficial) por unidad de electricidad producida para períodos de operación por sobre 25 años. Esto se debe al hecho de que la superficie de suelo ocupada para la energía solar no aumenta una vez que la planta se encuentra en operación, mientras que para el carbón existe una constante necesidad de extraer el mineral, lo que resulta en un aumento del suelo utilizado. En el caso de la energía solar, dependiendo del uso previo del suelo, la perturbación el suelo puede ser bastante limitada, mientras que para la minería de carbón la perturbación será severa. Para una planta fotovoltaica con 30 años de operación, Turney y Fthenakis estimaron que el uso de suelo de ciclo de vida sería un 15% menor que para una planta a carbón. Dado que el uso de suelo es estático durante la operación de una planta fotovoltaica, es más fácil devolver el suelo a su estado natural luego del cierre de la planta.

Respecto a los impactos sobre la vida silvestre de las plantas fotovoltaicas, estos incluyen el cerramiento de áreas y por lo tanto la limitación del movimiento de animales, la perturbación de suelos y vegetación, y cambios en microclimas. Estos potenciales impactos no han sido estudiados en profundidad y se espera que estén correlacionados a la biodiversidad del sitio.

---

<sup>41</sup>Turney, D. and V. Fthenakis. 2011. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3261–3270.

Se menciona que los desiertos verdaderos (tales como el desierto de Atacama) son los menos biodiversos de los biomas considerados. Sin embargo, es posible encontrar especies amenazadas en cualquier bioma, por lo que se recomienda un estudio específico de los ecosistemas para los alrededores de cada planta solar.

Se pronostica que los impactos del calentamiento global tendrán efectos severos sobre la biodiversidad, debido al alza en temperaturas, sequías, incendios y enfermedades causadas por parásitos<sup>42</sup>. Como se ha descrito en la Sección 2.2.2., la energía solar (y particularmente la de CdTe) ofrece una fuente energética con emisiones de gases de efecto invernadero significativamente menores que las alternativas disponibles, además de menores emisiones de contaminantes que afectan a la vida silvestre tanto como a las personas.

Fthenakis et al.<sup>43</sup> describen cómo First Solar, así como uno de sus competidores, han implementado buenas prácticas para prevenir y mitigar impactos a la vida silvestre en plantas solares en California. Estas prácticas incluyen:

- Evitar o minimizar conflictos: realizar censos de especies y hábitats, diseñar plantas para evitar áreas sensibles, utilizar técnicas de preparación de sitios y construcción de bajo impacto, evitar el uso de sustancias tóxicas y utilizar medidas de manejo tales como el uso de cercos con aperturas para que animales pequeños puedan circular libremente.
- Restauración: restaurar y mantener la cubierta vegetal removida durante la construcción para mejoramiento de hábitat.
- Desarrollo de áreas de compensación para la preservación de especies cuando se construyen proyectos en áreas sensibles, en caso de ser necesario.

Los autores mencionan que existen posibles impactos positivos de la instalación de plantas fotovoltaicas, tales como la protección del sitio de otras actividades de mayor impacto y financiamiento para el manejo y monitoreo de la biodiversidad.

Un informe publicado por la Agencia de Energías Renovables de Alemania<sup>44</sup> concluyó que, dependiendo de la selección del sitio y las prácticas empleadas, las plantas solares pueden tener impactos negativos limitados o incluso impactos positivos para la biodiversidad. En dicho informe se listan los puntos clave de los criterios utilizados por la Sociedad Alemana para la Conservación de la Naturaleza (NABU) para la construcción de parques solares amigables con el medio ambiente:

- No intervenir áreas protegidas (dar preferencia a sitios previamente sometidos a altos niveles de perturbación, tales como sitios de agricultura intensiva o sitios

---

<sup>42</sup>Fthenakis, V., Blunden, J., Green, T., Krueger, L., & Turney, D. 2011. Large photovoltaic power plants: Wildlife impacts and benefits. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA,

<sup>43</sup>Fthenakis, V., Blunden, J., T. Green, L. Krueger, and D. Turney. 2011. Large Photovoltaic Power Plants: Wildlife Impacts and Benefits. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA.

<sup>44</sup>Peschel, T. 2010. Solar parks – Opportunities for Biodiversity: A report on biodiversity in and around ground-mounted photovoltaic plants. *Renews Special*, Issue 45.

contaminados).

- Evaluación de compatibilidad basada en la Directiva de Aves de Europa.
- Evitar sitios expuestos (las plantas solares no deberían dominar el paisaje).
- El área sellada debiera ser pequeña (< 5%), donde sellado se refiere al sellado del suelo, por ejemplo, con fundaciones de hormigón.
- Los cercos no debieran presentar una barrera a pequeños mamíferos y anfibios.
- Los sitios debieran ser mantenidos con la ayuda de ovejas pastando o con podas de pasto, sin utilizar fertilizantes o pesticidas sintéticos.
- Las comunidades locales deben estar involucradas en la planificación del proyecto para aumentar su aceptación.

Es importante mencionar que estos criterios están enfocados en el contexto alemán y que no necesariamente todos ellos son directamente aplicables al norte de Chile (por ejemplo, la presencia de plantas solares en sitios expuestos en un paisaje desértico no necesariamente constituiría un problema).

Aunque no existe un estándar internacional para el uso responsable de suelo para plantas fotovoltaicas, este informe recomienda buenas prácticas para la conservación de la naturaleza, con ejemplos relevantes, para las etapas de planificación, construcción y operación de plantas solares:

- Etapa de planificación: cuidadosa selección del sitio, tomando en consideración las condiciones locales en el estudio o de impacto ambiental.
- Etapa de construcción: planificación y monitoreo ambiental, evitar el sellado del suelo, minimizar efectos de reflexión, contribuir a conservar la diversidad regional de especies vegetales, evitar los efectos de barrera ocasionados por los cercos.
- Etapa de operación: monitoreo de largo plazo, conservación y mantención ambiental del sitio.

El informe identificó que la instalación de plantas solares en suelos agrícolas previamente despejados con baja diversidad de especies como la mayor oportunidad respecto a mejoramiento de la biodiversidad.

### **2.2.7.- COSTES EXTERNOS**

Como se ha discutido en las secciones previas de esta revisión, la generación de electricidad fotovoltaica (y en particular la tecnología de CdTe) ofrece beneficios ambientales significativos en comparación con fuentes tradicionales de generación eléctrica, tales como los combustibles fósiles. Una manera de incorporar esta dimensión a la comparación de distintas fuentes de generación eléctrica es calculando los “costes externos” relacionados a daños ambientales y de salud en términos monetarios. Los proyectos ExternE de la Unión Europea (y los proyectos

NEEDS que les siguieron) ofrecen una base metodológica para estos cálculos. Este enfoque para la evaluación ambiental es bien aceptado, a pesar de que existe una alta incertidumbre y espacio para el debate relacionado a la valorización monetaria de los impactos ambientales<sup>45</sup>.

Estos costes externos, sumados al costo nivelado de la electricidad (LCOE por sus siglas en inglés), pueden ser utilizados para determinar el costo total de la electricidad. A pesar de que actualmente este costo total no se verá reflejado en el mercado, es una métrica relevante para la toma de decisiones, permitiendo la consideración de los beneficios sociales de fuentes más limpias de energía.

Sinha et al.<sup>46</sup> recientemente estudiaron el costo total de la electricidad para la generación fotovoltaica de CdTe en comparación con generación convencional a partir de gas natural y carbón. Sus cálculos consideraron el costo privado (LCOE) más la adición de un costo ambiental del ciclo de vida (considerando emisiones de gases de efecto invernadero, compuestos orgánicos volátiles, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Pb, Cd, PM<sub>2.5</sub> y uso de agua) y un costo de desempeño (relacionado a las fuentes variables de energía como la solar y la eólica). Los resultados mostraron que la tecnología de CdTe es competitiva con los combustibles fósiles, con un rango de costo total de la energía (en dólares de 2011) de \$0.07-0.15/kWh, mientras que para gas natural es de \$0.07-0.21/kWh y para carbón de \$0.10-0.26/kWh. El costo ambiental para CdTe se estimó en menos de \$1/MWh, mientras que para gas natural tuvo un costo ambiental medio de \$26/MWh (principalmente atribuible a emisiones gases de efecto invernadero y SO<sub>2</sub>) y para carbón de \$50/MWh (principalmente atribuible a uso de agua y emisiones gases de efecto invernadero y SO<sub>2</sub>).

---

<sup>45</sup>Fthenakis, V., and E. Alsema. 2006. Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 14:275–280.

<sup>46</sup>Sinha, P. M. de Wild-Scholten, A. Wade, and C. Breyer. 2013. Total Cost Electricity Pricing of Photovoltaics. EU PVSEC, Paris, France, 6DO.10.4.

## **2.3.- SEGURIDAD DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE CdTe**

Los módulos de First Solar poseen una garantía de 10 años desde su suministro frente a defectos en los materiales y calidad bajo condiciones de uso y servicio. También está garantizado que los módulos produzcan al menos el 90% de la potencia nominal durante los primeros 10 años después de su instalación y al menos el 80% durante los siguientes 15 años. Por otra parte, y para asegurar el funcionamiento y la seguridad de los módulos de CdTe, los módulos de First Solar están certificados de acuerdo a diferentes normas descritas en este apartado.

En este capítulo, se recoge también el análisis y la evaluación de los riesgos potenciales de los módulos durante su periodo de funcionamiento, entendiéndose este periodo como el tiempo transcurrido entre el momento en el que el módulo está terminado y listo para ser enviado a los clientes y el momento en el que el módulo se desconecta y se envía para ser reciclado. Durante este periodo se producirán al menos las siguientes operaciones:

- Transporte de los módulos a las instalaciones del cliente.
- Instalación de los módulos en la localización final.
- Periodo de explotación en el que los módulos están operativos.
- Retirada y/o recogida de los módulos.
- Transporte de los módulos a la planta de reciclaje.

Como se describió anteriormente, el riesgo potencial asociado a la tecnología de CdTe es debido a la posibilidad de liberar Cd durante su periodo de funcionamiento causando riesgos potenciales para las personas o el medio ambiente. Las situaciones que pueden ocasionar este riesgo potencial son: rotura, fuego, degradación (lixiviación) y liberación de CdTe. Estas cuatro posibilidades también se considerarán en las secciones siguientes.

### **2.3.1.- CERTIFICACIONES DE SEGURIDAD Y FIABILIDAD**

Los módulos de First Solar están certificados de acuerdo a las siguientes normas:

- IEC 61646 Módulos fotovoltaicos (FV) de lamina delgada para uso terrestre— Cualificación del diseño y homologación, que incluye una secuencia de ensayos específica para módulos de lámina delgada con una etapa especial de acondicionamiento mediante exposición prolongada a la luz. Esta norma internacional establece los requerimientos de los módulos para su operación a largo plazo en climas

generales (definidos en la IEC 60721-2-1). El objetivo de esta secuencia de ensayos es determinar las características térmicas y eléctricas del módulo y demostrar, en la medida de lo posible, con limitaciones razonables de coste y tiempo, que el módulo es capaz de soportar a la exposición prolongada en ambientes al aire libre.

- IEC 61730 Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV), clase A. Esta norma describe los requisitos fundamentales de construcción para los módulos FV con el fin proporcionar un funcionamiento eléctrico y mecánico seguro durante su tiempo esperado de vida. Toca temas específicos para evaluar la prevención del choque eléctrico, riesgos de fuego, y daños personales debidos a tensiones mecánicas y medioambientales.
- IEC 61701 Ensayo de corrosión por niebla salina de módulos FV. Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de los módulos fotovoltaicos a la corrosión por niebla salina. Este ensayo es útil para evaluar la compatibilidad de los materiales y la calidad y uniformidad de los recubrimientos protectores.
- IEC 60068-2-68 Ensayos medioambientales. Ensayos de polvo y arena. Esta norma especifica los métodos de ensayo para determinar los efectos del polvo y la arena suspendidos en el aire sobre los módulos FV.
- UL 1703 Módulos y paneles fotovoltaicos planos. Esta norma también garantiza la seguridad de los módulos durante su instalación y funcionamiento. El certificado de First Solar permite a los módulos ser usados en sistemas FV de hasta 1,000 V.
- El módulo "Series 3 Black" de First Solar es el primer modulo FV de lamina delgada que ha pasado los protocolos de *Thresher Test and Long Term Sequential Test*<sup>47</sup> desarrollados para estudiar la durabilidad a largo plazo.

### 2.3.2.- ROTURA

Un modulo puede sufrir una rotura en cualquier etapa de su periodo de funcionamiento. El transporte, la instalación, las operaciones de mantenimiento y la retirada de los módulos implican su manipulación. En estas operaciones, existe la posibilidad de dañar y/o romper el vidrio o cualquier otra parte del módulo. Este tipo de daño también puede ocurrir durante el periodo de vida útil. Basado en la experiencia de First Solar<sup>48</sup>, el porcentaje de rotura de módulos es muy bajo, del orden de 0,03 %/año desde su instalación hasta concluir los 25 años de funcionamiento.

En caso de rotura, existe un riesgo potencial ya que el CdTe puede estar expuesto al ambiente

---

<sup>47</sup> Sinha, P.. " Life cycle materials and water management for CdTe photovoltaics". Solar Energy Materials & Solar Cells, 119, 271-275. 2013

<sup>48</sup> "Appendix 10: PV module detection and handling plan", Topaz solar farm project. First Solar, 2012

y a las personas. En esa situación, el teluro de cadmio permanece estable en un módulo roto como un compuesto sólido y no se produce su degradación química. Además, los módulos de First Solar se construyen laminando la capa de CdTe entre dos placas de vidrio con un adhesivo polimérico industrial. Cuando el módulo se fractura, es poco probable que el resultado de la rotura sea la delaminación del módulo lo que reduce la posibilidad de que el CdTe se exponga al ambiente directamente. Además, la baja presión de vapor del compuesto en condiciones de operación normales asegura que no existan emisiones de Cd y Te al medio ambiente.



**Figura 19** Ejemplo de patrón de rotura típico de los módulos de First Solar

En el caso de que exista una rotura importante del módulo durante su manipulación, el CdTe puede entrar en contacto con la piel y la ropa de las personas. Sin embargo, el peligro del CdTe proviene principalmente de su inhalación. En la revisión bibliográfica realizada no se encontraron evidencias de que el CdTe pueda ser absorbido a través de la piel y no se ha informado sobre efectos graves en contacto con ojos o piel<sup>49</sup>. En caso de que exista contacto con el polvo de CdTe, se recomienda lavar la zona con abundante agua y quitar las ropas contaminadas ya que el polvo puede provocar irritaciones en la piel.

Durante el mantenimiento rutinario de sistemas FV, se supervisan los módulos para encontrar roturas a través de inspecciones visuales y monitorización de la potencia producida (siempre y cuando el sistema de monitorización esté disponible)<sup>50</sup>. En conclusión y en nuestra opinión, un módulo de First Solar dañado o roto se puede clasificar como de riesgo cero en cualquier etapa de su periodo de funcionamiento.

Se incluye un comentario especial sobre terremotos ya que son comunes en Chile, aunque no existe información específica o datos en campo sobre este tema en el momento de la realización de este informe. En la autorización de proyectos FV a gran escala en el oeste de Estados Unidos, se utilizó la detección de módulos rotos y protocolos de manipulación definidos<sup>51</sup> para evaluar el riesgo en terremotos. Si ocurre un terremoto y asumiendo que la actividad sísmica es lo suficientemente intensa como para dañar las estructuras que soportan

<sup>49</sup> 5N PLUS, Material Safety Data Sheet V2, 2007

<sup>50</sup> P. Sinha, R. Balas, L. Krueger, A. Wade, "Fate and transport evaluation of potential leaching risks from cadmium telluride photovoltaics", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, 7, 2012, 1670-1675

<sup>51</sup> "Appendix 10: PV module detection and handling plan", Topaz solar farm project. First Solar, 2012

los módulos fotovoltaicos, se puede decir que, basado en información y estudios relacionados, (mencionados en esta sección), se mantiene la conclusión de que un módulo roto con la tecnología de CdTe de First Solar se puede clasificar como de riesgo cero. Sin embargo, se recomienda investigar el funcionamiento de las estructuras y módulos ante terremotos para adaptar su diseño y reducir el riesgo de rotura durante un posible movimiento sísmico que pueda ocurrir en Chile u otras áreas con alta actividad sísmica.

### **2.3.3.- CIRCUNSTANCIAS PELIGROSAS (FUEGO)**

El riesgo de fuego es un aspecto controvertido en las aplicaciones fotovoltaicas con tecnología de CdTe. La peligrosidad está relacionada con las emisiones de Cd en humos o partículas durante la descomposición del CdTe a altas temperaturas. La primera publicación científica a este respecto fue realizada por Fthenakis y coautores<sup>52</sup>.

El experimento realizado por Fthenakis<sup>52</sup> se diseñó para seguir la curva de temperatura estándar descrita en la norma ASTM E119-98 para ensayo de fuego en materiales y construcción de edificios y protocolos UL. Además, se prestó especial cuidado para evitar pérdidas de Cd y Te durante el experimento y se presentó una descripción muy precisa de la metodología seguida para recoger y analizar el contenido de Cd y Te. También, proporciona descripciones de los equipos, incluyendo valores de incertidumbre y barras de error en los datos. El estudio concluye que:

- Sólo un porcentaje de Cd del  $0.5\% \pm 0.1\%$  se emitió durante el ensayo en el rango de temperaturas entre 760°C y 1100°C.
- Las pérdidas de Cd se producen en el perímetro de la muestra antes de que las dos placas de vidrio se fundan.
- La mayoría del Cd se difunde en la matriz de vidrio.
- La emisión es muy pequeña a temperaturas entre 700°C y 900°C pero es mayor entre 1000°C y 1100°C.

Durante un fuego, la capa de adhesivo polimérico intermedio (laminado) arde y se descompone a aproximadamente 450°C mientras que el vidrio tiene un punto de reblandecido de 715°C. El experimento demostró que el 99,5% del contenido en cadmio del módulo de CdTe se difundía en el vidrio durante el fuego y se encapsulaba dentro de las dos matrices de vidrio fundidas: una pequeña cantidad de cadmio escapaba del perímetro del módulo antes de que las dos placas de vidrio se fundieran.

El experimento se realizó utilizando EVA como material para el laminado. Actualmente, los módulos de CdTe de First Solar utilizan para el laminado un material adhesivo polimérico diferente. Después de analizar la información técnica suministrada por First Solar sobre el

---

<sup>52</sup> V. Fthenakis, M. Fuhrmann, J. Heiser, A. Lanzirrotti, J. Fitts and W Wang, "Emission and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires" Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 13, 8, 713-723, 2005

comportamiento térmico del nuevo material, en nuestra opinión, este cambio no afecta a las conclusiones extraídas del experimento.

El experimento se realizó con muestras de 25 cm x 3 cm y sin borde de exclusión para el CdTe, si bien esta configuración no corresponde a la actual de los módulos de CdTe de First Solar. En esa situación, las emisiones de Cd son menos del 0,04% del contenido total de Cd, estimándose que las emisiones de Cd eran de 0,06 mg/GWh. asumiendo que la probabilidad de fuego en casas con estructura de madera en Estados Unidos es de 1 entre 10<sup>4</sup>, el contenido de Cd de 7 g/m<sup>2</sup>, la eficiencia de conversión del 10% y 1800 kWh/(m<sup>2</sup>-año) de radiación total. En el caso muy improbable de que el modulo se rompiera en pequeñas piezas durante el fuego, las emisiones de Cd subirían a 0,8 mg/GWh. Este escenario asume el peor de los casos.

Fthenakis consideró que las emisiones de Cd eran nulas en instalaciones montadas en el suelo por la falta de materiales combustibles en esa configuración.

En 2011, la Agencia de Bavaria para la Protección del Medio Ambiente (Bavarian Environmental Protection Agency) realizó cálculos bajo ciertas condiciones<sup>53</sup> sobre la emisión de cadmio y humos de óxidos (CdO y TeO<sub>2</sub>) durante un fuego con módulos fotovoltaicos que contenían CdTe. En las condiciones más conservadoras del estudio, las emisiones de cadmio estaban por debajo de los niveles establecidos en AEGL-2/ERPG-2<sup>54</sup> por lo que se concluyó que si los módulos de CdTe arden se excluye un peligro serio en el vecindario.

Aunque, en nuestra opinión, la investigación científica de Fthenakis es exhaustiva y de muy alto nivel se pueden encontrar opiniones diferentes<sup>55</sup>. Algunos expertos no están de acuerdo con la manera en la que se diseñó el experimento, señalando que temperaturas de 1200°C no son inusuales en fuegos en edificios y que, cuando los módulos están instalados con un cierto ángulo, la temperatura puede no ser uniforme. Surge también la posibilidad de que el material del laminado se funda y que una de las placas de vidrio se deslice. En este escenario, el CdTe se podría encontrar expuesto al medio ambiente y podría descomponerse totalmente. Respecto a esta opinión, no se han presentado datos de expertos que apoyen esta teoría; además, en nuestra revisión bibliográfica, no encontramos estudios científicos, datos o información que reproduzcan estas situaciones específicas. Además, respecto a la preocupación sobre la posibilidad de emisiones mayores, habría que tener en cuenta el estudio publicado por la Agencia Bávara de Protección del Medio Ambiente<sup>49</sup>, presentado anteriormente, que evaluaba las emisiones en el peor caso, considerando que el contenido total de Cd del módulo de CdTe se liberaba durante un fuego.

Para avanzar un paso más, se han calculado las emisiones reales de Cd producidas en fuegos

<sup>53</sup> "Calculation of emissions in case of fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules", Bavarian Environmental Protection Agency, 2011

<sup>54</sup> AEGL: Niveles Guía de Exposición Aguda (Acute Exposure Guideline Levels); ERPG: Directrices para la Planificación de Respuesta a Emergencias (Emergency Response Planning Guidelines); Grado de gravedad (severity degree) 2: Umbral de efectos irreversibles y otros efectos para la salud graves y de larga duración que impiden abandonar la escena

<sup>55</sup> D. Sollmann, C. Podewils, "How dangerous is cadmium telluride?" Photon International 3, 100-109, 2009

en los que había módulos de CdTe de First Solar. Utilizando el dato de potencia instalada con módulos de CdTe en el año 2010<sup>56</sup> y considerando que todos los módulos instalados sufrían el mismo daño durante el fuego, se calcularon unas emisiones de Cd de 11.2 g. Asumiendo el escenario en el peor caso (que los módulos se rompen en pequeñas trozos), el Cd emitido al ambiente sería de 140 g. Para el cálculo, se han tomado de la referencia 52 datos como: gramos de Cd por m<sup>2</sup>, probabilidad de ocurrencia de fuego y las emisiones de Cd.

En el único suceso reportado en la literatura<sup>55</sup> en el que módulos de First Solar estuvieron envueltos en un fuego, sólo 0.5 toneladas de las 5 toneladas de módulos instalados fueron afectadas por el fuego por lo que los cálculos realizados están muy alejados de los datos reales del accidente.

En nuestra opinión, en caso de accidente con fuego, las emisiones de Cd son muy bajas y el riesgo para las personas y el medio ambiente insignificante.

### 2.3.4.- DEGRADACIÓN

Un segundo motivo de preocupación para el medio ambiente y la salud relacionados con la utilización de CdTe en aplicaciones fotovoltaicas se refiere a la posibilidad de que existan emisiones de cadmio debido a diferentes efectos de lixiviación ya que el Cd disuelto se considera un contaminante para el agua y el suelo. Las pruebas de lixiviación están diseñadas para evaluar este riesgo potencial.

En un proceso de lixiviación, las condiciones medioambientales son críticas; parámetros como el pH, formación de complejos, potencial redox, la fuerza iónica del medio, el tiempo de lixiviación, la superficie de la muestra y el ratio líquido/sólido pueden afectar en gran medida la solubilidad de los materiales. En los vertederos de desechos, no se controlan estos parámetros. E este sentido, se han desarrollado varias pruebas de lixiviación para simular diferentes condiciones<sup>57</sup>.

Específicamente, durante el periodo de funcionamiento del módulo fotovoltaico, la única posibilidad de liberar cadmio al agua o el suelo es por un accidente en el que un módulo de CdTe roto o dañado se encuentre expuesto al agua de lluvia. Steinberger llevó a cabo un experimento en campo para simular esta situación<sup>58</sup>. En el experimento, se realizaron pruebas con diferentes tamaños de muestras (descritos como "fragmentos de 10 mm" y un módulo completo) para considerar el peor caso. A partir de sus resultados experimentales, se concluía que el área de CdTe expuesta al agua de lluvia era una variable crítica. La muestra con fragmentos de 10 mm mostró una concentración de Cd de 1 mg/L. El estudio considera que en

---

<sup>56</sup> Datos de First Solar

<sup>57</sup> A. Finke, A. Kriele, W. Thumm, D. Bieniek, A. Ketrup, "Leaching tests with thin film solar cells based on copper indium diselenide (CIS)" Chemosphere 32, 8, 1633-1641, 1996

<sup>58</sup> H. Steinberger, "Health, Safety and Environmental Risks from the Operation of CdTe and CIS Thin-film Modules", Progress in Photovoltaics: Research and Applications 6, 99-103, 1998

un caso real, la relación entre el área con módulos rotos y el área del tejado sería sólo de 1/200 así que, multiplicando el resultado del experimento con este valor asumido, la concentración de Cd en el agua recogida del tejado sería de 5 µg/L, que está en el límite de la normativa alemana para el agua potable. También, este estudio científico revela que los resultados para la contaminación del suelo presentan un ligero aumento de la concentración de Cd respecto a la abundancia natural. Sin embargo, en nuestra opinión, los experimentos no están bien descritos en el estudio, y no hay ninguna conclusión clara que se pueda extraer de ellos. En 2012, otro estudio sobre lixiviación fue publicado por Sinha et al.<sup>59</sup> en base a cálculos de los impactos potenciales para el suelo, el aire y las aguas subterráneas. Se modeló el peor caso de lixiviación por agua de lluvia de módulos rotos de CdTe en un edificio comercial. Los resultados de la exposición al Cd obtenidos fueron de uno a cinco órdenes de magnitud por debajo de los niveles límite de salud definidos en California y en el sur de Alemania. En este contexto, el estudio demuestra que el riesgo potencial para la salud de los trabajadores en el lugar del accidente o residentes en el entorno es poco probable.

Además, los módulos fotovoltaicos de CdTe de First Solar han pasado el Procedimiento de Lixiviación para la Característica de Toxicidad (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP), de acuerdo al método EPA 1311 de Estados Unidos, con un resultado <1,0 mg Cd/L en el lixiviado por lo que se clasifican como residuos no peligrosos en Estados Unidos. En Europa, se consideran también como un residuo no peligroso porque el contenido de Cd en los módulos de CdTe es inferior a 0,1% del peso total<sup>60</sup>. Como se señaló anteriormente, la construcción del módulo con dos placas de vidrio laminado reduce en gran medida la probabilidad de que un módulo roto exponga una porción significativa del material semiconductor al medio ambiente en caso de que el módulo roto permanezca en el campo.

En Chile, en tanto, un estudio<sup>61</sup> realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) de la Universidad de Chile sobre cinco muestras de módulos de First Solar, concluyó que de acuerdo a la normativa chilena:

- Ninguna de las muestras analizadas presentan características de peligrosidad tóxica aguda.
- Estas muestras deben ser calificadas como no peligrosas por toxicidad crónica asociada a presencia de sustancias cancerígenas.
- Ninguna de las muestras analizadas presentan características de peligrosidad tóxica crónica asociada a sustancias no cancerígenas.

En condiciones normales de funcionamiento, y si no se produce una rotura, el teluro de cadmio no está expuesto al ambiente por lo que el riesgo de lixiviación de Cd durante el período de

<sup>59</sup> P. Sinha, R. Balas, L. Krueger, A. Wade, "Fate and transport evaluation of potential leaching risks from cadmium telluride photovoltaics", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, 7, 1670-1675, 2012,

<sup>60</sup> Documentación de First Solar, 2013

<sup>61</sup> CENMA, 2013. "Estudio de toxicidad aguda y crónica asociada a la concentración de metales en muestras denominadas 130821031117, 130806250325, 130804262920, 130803031839, 130823040982." Preparado por el Centro Nacional del Medio Ambiente de la Universidad de Chile para First Solar Energía Ltda.

funcionamiento del módulo es cero. Con el fin de evitar cualquier riesgo en este sentido, se recomienda realizar operaciones de mantenimiento preventivas para detectar cualquier daño en los módulos.

En referencia a la posible ubicación de las plantas solares de First Solar en el norte de Chile, las precipitaciones son escasas y la región es una de las más secas del mundo, lo que reduce aún más la probabilidad de que ocurra cualquier proceso de lixiviación.

### **2.3.5.- FIN DE LA VIDA ÚTIL**

Una vez que los módulos fotovoltaicos de CdTe han alcanzado el final de su periodo operacional, probablemente serán retirados y reciclados o se desecharán como basura. La Directiva sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos de la Unión Europea obliga a que todos los productos fotovoltaicos fuera de servicio sean recogidos y reciclados a partir de febrero de 2014 debido a la inclusión de estos productos en la Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de fecha 4 de julio de 2012. First Solar es actualmente la única compañía fotovoltaica que dispone de un programa de reciclaje a escala industrial y global.

Respecto a la eliminación de los módulos fotovoltaicos de CdTe como desecho al final de su vida útil, el estudio científico presentado por Kaczmar<sup>62</sup> en la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental, 33ª Reunión Anual de América del Norte, en 2012, investigaba los riesgos asociados a posibles liberaciones de lixiviados de los desechos de módulos fotovoltaicos de CdTe en un vertedero sin muros de contención bajo condiciones ácidas y básicas. En este trabajo, se utilizó el Software de Evaluación de la Exclusión de Riesgos de Estados Unidos (Delisting Risk Assessment Software, DRAS) para simular el impacto potencial en la salud humana y en el medio ambiente asociado a la generación y liberación de los lixiviados de un proyecto de 25 MW<sub>ac</sub> desechado durante un año. El software hace uso del volumen de residuos y de los datos de toxicidad TCLP (Procedimiento de Lixiviación para la Característica de Toxicidad) para calcular, a través de una simulación Monte Carlo, el riesgo carcinogénico o de otras enfermedades y peligros asociados con el material en vertederos (Cd procedente de paneles fotovoltaicos de CdTe en este caso). Este modelo (DRAS) evalúa el riesgo en varios escenarios de exposición (ingestión de agua subterránea, absorción dérmica mientras un individuo se baña en agua subterránea y la inhalación de compuestos volátiles de las aguas subterráneas en la ducha) y de cuatro vías de exposición en superficie (ingestión de agua de la superficie, la ingestión de polvo de la superficie, la ingestión de pescado y la inhalación de vapor y partículas). De acuerdo con este estudio, la eliminación de módulos de CdTe de un proyecto de 25 MW<sub>ac</sub> en un vertedero sin muros de contención no es probable que represente

---

<sup>62</sup> S. Kaczmar, "Evaluation of potential health and environmental impacts from end-of-life disposal CdTe photovoltaics" Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) North America 33<sup>rd</sup> Annual Meeting, 2012

un riesgo de cáncer o de otras enfermedades significativas, ya que el riesgo está muy por debajo de los valores límite.

Aparte del estudio anteriormente citado, otro estudio realizado en 2010 por el Instituto Geotécnico Noruego (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) también investigaba los riesgos ambientales sobre el uso y la eliminación final como desecho de los módulos fotovoltaicos de CdTe<sup>63</sup>. Según este estudio, los valores de lixiviación superan los límites para su eliminación como desecho en un vertedero de residuos inertes, pero se mantienen dentro de los límites establecidos para vertederos ordinarios y peligrosos (según el reglamento de residuos noruego, Capítulo 9, Anexo II). Por lo tanto, el riesgo de propagación incontrolada de contaminantes de Cd y Te debido a la eliminación como desecho de módulos de CdTe en vertederos aprobados se considera que es bajo, dado que los vertederos actuales tienen requisitos estrictos en cuanto al sellado de la parte inferior y laterales así como en lo referente a la recogida de lixiviados del vertedero. Sin embargo, el vertido incontrolado de módulos de CdTe supone riesgos ambientales mayores en comparación con la eliminación controlada de los mismos. Para todas las tecnologías fotovoltaicas, la gestión responsable de los residuos al final de su vida útil es importante ya que el uso de materiales ambientalmente sensibles (por ejemplo, Pb, Cd, y compuestos de Se) es común en esta industria.

En el caso particular de que el reciclaje de los módulos se realice en Estados Unidos - dado que ese fue su origen - su envío requiere que los módulos de CdTe sean calificados como material no peligroso. A partir de los resultados obtenidos del estudio de CENMA, comentados en la sección anterior, se espera que los residuos de los módulos fotovoltaicos de First Solar sean calificados como material no peligroso por la autoridad ambiental chilena. El reciclaje en otros países, como Alemania o Malasia, no está sujetos a esta condición para su envío.

---

<sup>63</sup> G. Okkenhaug, "Environmental risks regarding the use and final disposal of CdTe PV modules" Norwegian Geotechnical Institute, 2010

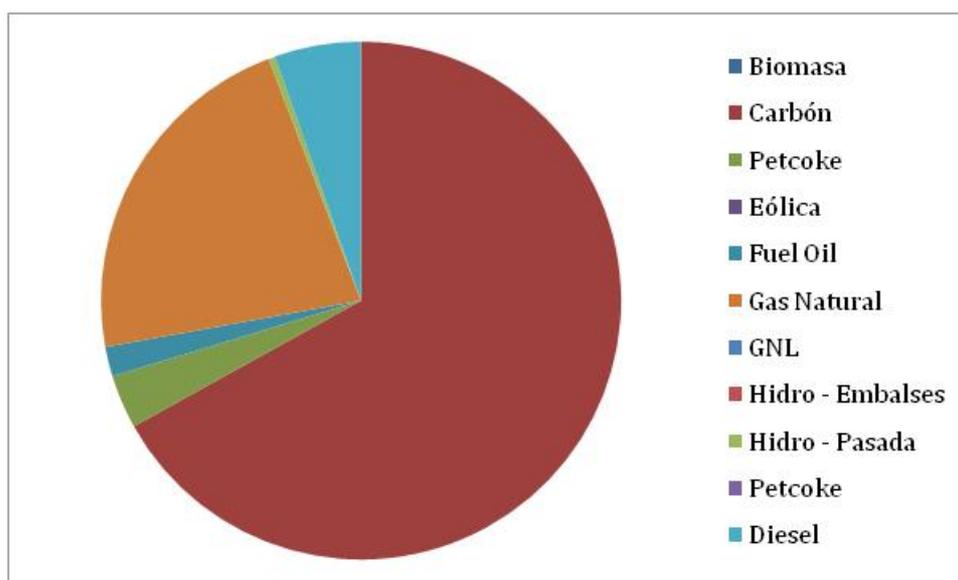
### 3.- ANEXOS

#### 3.1.- COMPOSICIÓN REDES ELÉCTRICAS CHILENAS: SIC & SING

Las redes eléctricas usadas en el presente estudio fueron obtenidas como un promedio de los años 2010 a 2012, para incluir la variabilidad interanual de las precipitaciones, las cuales afectan directamente al porcentaje de energía hidroeléctrica del SIC. La información fue obtenida de la Comisión Nacional de Energía (CNE) de Chile.<sup>64</sup>

##### 3.1.1.- COMPOSICIÓN RED ELÉCTRICA SING

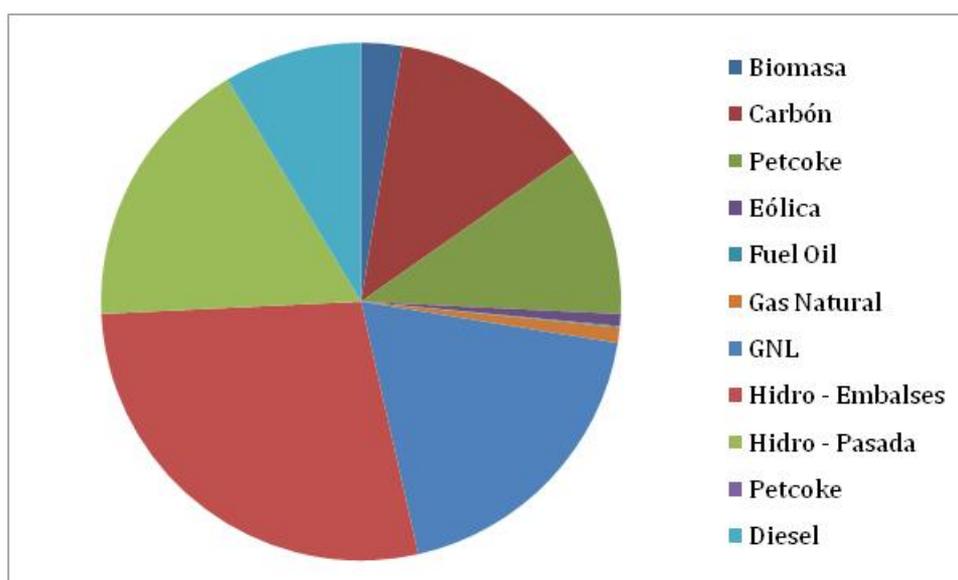
Fuente de Energía Primaria	2010	2011	2012	Promedio
Biomasa	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Carbón	48,5%	69,6%	82,5%	<b>66,87%</b>
Petcoke	9,4%	0,2%	0,4%	<b>3,35%</b>
Eólica	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Fuel Oil	2,6%	1,8%	1,2%	<b>1,86%</b>
Gas Natural	26,8%	25,8%	13,6%	<b>22,08%</b>
GNL	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Hidro - Embalses	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Hidro - Pasada	0,4%	0,4%	0,5%	<b>0,41%</b>
Petcoke	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Diesel	12,4%	2,1%	1,6%	<b>5,37%</b>
Solar	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>



<sup>64</sup>Comisión Nacional de Energía. "Generación Bruta SIC – SING". 2013. Obtenido de [http://www.cne.cl/images/stories/estadisticas/energia/Electricidad/generacion\\_bruta\\_sic\\_sing.xls](http://www.cne.cl/images/stories/estadisticas/energia/Electricidad/generacion_bruta_sic_sing.xls)

### 3.1.2.- COMPOSICIÓN RED ELÉCTRICA SIC

Fuente de Energía Primaria	2010	2011	2012	Promedio
Biomasa	1,9%	1,9%	3,7%	<b>2,54%</b>
Carbón	9,9%	11,7%	16,4%	<b>12,68%</b>
Petcoke	10,5%	11,0%	10,2%	<b>10,55%</b>
Eólica	0,8%	0,7%	0,8%	<b>0,75%</b>
Fuel Oil	0,0%	0,1%	0,1%	<b>0,09%</b>
Gas Natural	2,5%	0,2%	0,1%	<b>0,97%</b>
GNL	14,4%	21,6%	20,7%	<b>18,91%</b>
Hidro - Embalses	30,6%	28,0%	24,7%	<b>27,76%</b>
Hidro - Pasada	18,5%	16,7%	16,4%	<b>17,19%</b>
Petcoke	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
Diesel	10,8%	8,1%	6,9%	<b>8,58%</b>
Solar	0,0%	0,0%	0,0%	<b>0,00%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>



### 3.2.- DATOS PARA OTROS SISTEMAS FV

La siguiente información, usada para comparar EPBT y tasas de emisión de GEI, fue obtenida de Peng et al<sup>65</sup>.

Autor	Locación	Irradiación [kWh/m <sup>2</sup> /año]	Eficiencia Módulo	Vida útil [año]	Factor Desempeño	EPBT [año]	Tasas emisión GEI [g CO <sub>2</sub> -eq./kWh]	Observaciones
<b>Ito &amp; Komoto</b>	China	1702	N/A	N/A	0,78	2,1	50	Sistema FV de gran escala instalado en el desierto.
<b>Kato</b>	Japón	1430	0,103	20	0,81	1,7	14	Marco, escala de producción de 10MW
<b>Raugei &amp; Bargigli</b>	Sur-Europa	1700	0,09	20	0,75	1,5	48	Marco
<b>Alsema &amp; Wild-Scholten</b>	Sur-Europa	1700	0,09	30	0,75	1,1	25	Sistema montado sobre suelo, producción EE.UU. sin marco.
<b>Fthenakis &amp; Kim</b>	EE.UU	1800	0,09	30	0,8	1	23,6	Sin marco
<b>Wild-Scholten</b>	Sur-Europa	1700	0,109	30	0,75	0,84	16	Con marco, instalado sobre techo.
<b>Fthenakis</b>	Sur-Europa	1700	0,109	N/D	0,8	0,79	18	Instalado sobre suelo.
<b>Este estudio</b>	Norte-Chile1	2533	0,127	30	0,8	0,6	12,2	Instalado sobre suelo, ángulo fijo ajustado, instalado en el desierto. Red eléctrica SIC
<b>Este estudio</b>	Norte-Chile2	2537	0,127	30	0,8	0,4	12,3	Instalado sobre suelo, ángulo fijo ajustado, instalado en el desierto. Red eléctrica SING

<sup>65</sup>Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 255-274

### 3.3.- TASAS DE EMISIÓN DE GEI PARA DIFERENTES FUENTES ELÉCTRICAS

Las siguientes tasas de emisión de GEI para fuentes eléctricas fueron obtenidas de procesos de Ecoinvent y usando los factores de caracterización de World ReCiPe Midpoint (H) v1.06. Norte-Chile1 y Norte-Chile2 son las calculadas en la sección 2.2.2.

<b>Fuente Electricidad</b>	<b>Tasas emisión GEI (g CO2 eq/kWh)</b>	<b>Proceso Ecoinvent</b>
<b>Carbón</b>	1080	Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U
<b>SING</b>	996	Electricity, medium voltage, production SING - CHILE 2010-2012, at grid/CL U
<b>Gas Natural</b>	642	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
<b>UCTE</b>	531	Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U
<b>SIC</b>	475	Electricity, medium voltage, production SIC - CHILE 2010-2012, at grid/CL U
<b>Biomasa</b>	147	Electricity, biowaste, at waste incineration plant, allocation price/CH U
<b>Norte-Chile2</b>	12,3	-
<b>Norte-Chile1</b>	12,1	-
<b>Eólica</b>	11,2	Electricity, at wind power plant/RER U