

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental

**Análisis del Ciclo de Vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio  
policristalino en Costa Rica**

Natalia Bonilla Gámez

Cartago, Mayo, 2016



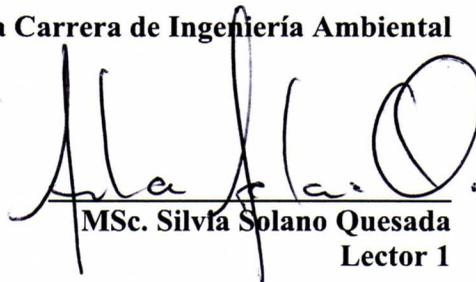
## **Análisis del Ciclo de Vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica**

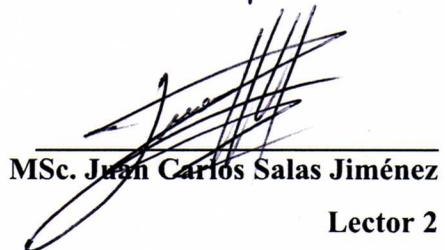
Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

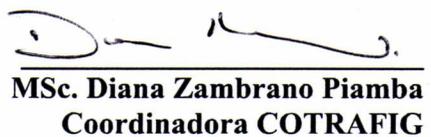
### **Miembros del tribunal**

  
MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga  
Directora

**Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental**

  
MSc. Silvia Solano Quesada  
Lector 1

  
MSc. Juan Carlos Salas Jiménez  
Lector 2

  
MSc. Diana Zambrano Piamba  
Coordinadora COTRAFIG

  
PhD. Floria Roa Gutiérrez  
Directora Escuela de Química

## DEDICATORIA

*A mis papás y hermano, por ser mi razón de ser, mi motor y máxima inspiración.*

*Ellos me enseñaron el verdadero significado de lo que es la felicidad,  
son el tesoro más preciado de mi vida.*

*Mis logros son resultado de lo que me han inculcado.*

*A Ade, por ser mi ángel de la guarda, ella es mi vida.*

*La que me ha dado amor incondicional,  
y me ha enseñado siempre el valor de la humildad.*

*A Dios, el ser supremo, y gran maestro que nos rodea,*

*que me llena cada día de luz y energía,  
y me transmite un amor infinito.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, profesora y coordinadora de carrera, MSc. Ana Lorena Arias, por siempre recibirme en su oficina y guiarme cada vez que ocupaba un consejo, y principalmente por apoyarme en mis aventuras por el mundo. Siempre será una gran inspiración para mí.

Al profesor, Dr. Carlos Meza, por abrirme las puertas del SESLab y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

A Harold Steinvorth, y la empresa Enertiva, por haberme donado los paneles fotovoltaicos que fueron la herramienta más importante de mi proyecto.

Al profesor Juan Carlos Salas, encargado del CTTM, por haberme colaborado con el desmantelamiento y gestión del panel.

A Héctor del Laboratorio Institucional de Microscopía, por ayudarme con todos los análisis químicos de los materiales.

Al profesor William Benavides y especialmente al encargado del Taller de Materiales, Marvin, por haberme facilitado el uso de los hornos para realizar las pruebas térmicas.

A Jorge Calderón, mi apoyo incondicional y mi mejor amigo, por caminar junto a mí estos años, transmitiéndome amor y paz, recordándome la esencia de la vida e inspirándome con una sonrisa.

A Silvia Solano, una gran amiga y compañera de trabajo, por todas esas tardes de café en las que juntas descifrábamos una vez más todo lo relacionado al mundo de SimaPro, y por prestarme la ISO.

A Maurice Goris, del ECN, por asesorarme en todo momento con el proyecto, y estar atento a mis correos.

A los SESLabs (Jo, Hugo, Javi, Adri, Sebas, Joha y Raque), mis compañeros de trabajo, por siempre alegrarme el día y sacarme una sonrisa en todo momento.

A la compañera Melissa Díaz, por ser un apoyo para mí con SimaPro y ACV, y estar siempre dispuesta a ayudarme.

A doña Flory y don Álvaro, por siempre recibirme con amor en su casa y chinearne como a una hija más.

A las chiquitinas (Wen, Marce, Karlita y Caro), por haberme acompañado durante todos estos años de carrera juntas, por ser mis mejores amigas y hermanas del alma.

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV	Análisis del Ciclo de Vida
CADIS	Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable
CC	Cambio climático
CENSE	Centro Nacional de Control de Energía
CFC	Clorofluorocarbonos
CTTM	Centro de Transferencia y Transformación de Materiales
CU-PV	Cradle-to-Cradle sustainable PV modules
ECN	Energy Research Center from Netherlands
EDS	Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva
EICV	Evaluación del impacto del ciclo de vida
EVA	Etil Vinil Acetato
FD	Agotamiento combustibles fósiles
FE	Eutrofización de agua dulce
FRELP	Full Recovery End of Life Photovoltaics
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
ICV	Análisis del inventario del ciclo de vida
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
ME	Eutrofización Marina
MINAET	Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicación
NMVOC	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano
PET	Tereftalato de Polietileno
POF	Formación de oxidantes fotoquímicos

PPO	Óxido de Polifenileno
PVF	Polivinilo de Fluoruro
SSV	Stazione Sperimentale del Vetro di Murano
TA	Acidificación terrestre
VICAL	Grupo Vidriero Centroamericano
VICESA	Vidriera Centroamericana S.A
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampere
C	Calor específico
CH <sub>4</sub>	metano
cm	centímetro
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
eq	equivalente
g	gramos
GWh	gigawatt-hora
h	hora
J	joules
K	Kelvin
kg	kilogramos
km	kilometro
kW	kilowatt
kWh	kilowatt-hora
min	minutos
MJ	megajoules
mm	milímetro
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
MPa	megapascal
N	nitrógeno
N <sub>2</sub> O	óxido de nitrógeno
P	fósforo
Q	transferencia de energía en forma calorífica

s	segundos
SO <sub>2</sub>	óxido de azufre
t	tonelada
V	voltio
W	watts
wt	peso
°C	grados celsius
%	porcentaje
ΔT	Delta-T
μm	micrometros

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1 Porcentajes de composición por peso de los principales componentes del panel fotovoltaico cristalino .	10
Cuadro 3-1 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones y marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	19
Cuadro 3-2 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior y frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	20
Cuadro 3-3 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de los contactos metálicos de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	20
Cuadro 3-4 Machote de la matriz de evaluación que se le aplicó a los materiales de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	22
Cuadro 4-1 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones y el marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino.....	26
Cuadro 4-2 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior y cubierta frontal de dos celdas de panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	27
Cuadro 4-3 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de los contactos metálicos de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	27
Cuadro 4-4 Alternativa de gestión y lugar de gestión según cada tipo de material del panel fotovoltaico cristalino ..	37
Cuadro 4-5 Costo por gestión de un panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	39
Cuadro 4-6 Datos de entrada de procesos requeridos para la fabricación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en China .....	40
Cuadro 4-7 Datos de entrada de materiales utilizados para la fabricación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en China .....	41
Cuadro 4-8 Datos de procesos de transporte del panel fotovoltaico de su lugar de fabricación a Costa Rica .....	42
Cuadro 4-9 Datos de escenarios de gestión de los residuos y sus respectivos procesos de transporte para el escenario línea base.....	43
Cuadro 4-10 Proceso de asignación creado en SimaPro para 1 kWh de energía eléctrica según la matriz energética de Costa Rica del año 2015 .....	44
Cuadro 4-11 Datos de escenarios de gestión de los residuos y sus respectivos procesos de transporte para el escenario línea base.....	45
Cuadro 4-12 Resultados de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la recuperación de los materiales de un módulo de silicio policristalino (por m2) .....	50
Cuadro 8-1 Matriz de evaluación para el marco de aluminio del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	71
Cuadro 8-2 Matriz de evaluación para el vidrio templado de la cubierta frontal del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	71
Cuadro 8-3 Matriz de evaluación para el Óxido de Polifenileno de la caja de conexiones del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	72

Cuadro 8-4 Matriz de evaluación para la celda de silicio, y la lámina de Etil Vinil Acetato del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	72
Cuadro 8-5 Matriz de evaluación para el Polivinilo de Fluoruro y el Tereftalato de Polietileno y la lámina de Etil Vinil Acetato del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	72
Cuadro 8-6 Matriz de evaluación para los contactos metálicos del panel fotovoltaico de silicio policristalino .....	73
Cuadro 9-1 Propiedades del vidrio (Sosa, Cal y Sílice) utilizado en la capa frontal de los paneles fotovoltaicos cristalinos .....	85
Cuadro 9-2 Propiedades del Aluminio Anodizado utilizado en los marcos de los paneles fotovoltaicos cristalinos ..	86
Cuadro 9-3 Propiedades del Etil-Vinil-Acetato utilizado en el encapsulante de los paneles fotovoltaicos cristalinos	86
Cuadro 9-4 Propiedades del Polivinilo Fluoruro utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos .....	87
Cuadro 9-5 Propiedades del Tereftalato de Polietileno utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos .....	87
Cuadro 9-6 Propiedades el silicio utilizado en las celdas de los paneles fotovoltaicos cristalinos .....	88
Cuadro 9-7 Propiedades del Óxido de Polifenileno utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos .....	88
Cuadro 9-8 Costo de gestión de paneles fotovoltaicos .....	89
Cuadro 9-9 Costo unitario de logística, pre-tratamiento y reciclaje, ingresos por venta de fracciones resusltantes y balance neto .....	89
Cuadro 9-10 Descripción del panel fotovoltaico de silicio policristalino utilizado como muestra.....	90
Cuadro 9-11 Datos técnicos del horno eléctrico utilizado para los tratamientos térmicos del panel fotovoltaico .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Etapas del ciclo de vida de un panel fotovoltaico. Tomado de Fthenakis, Kim, Frischknecht, Raugei, et al. (2011).....	6
Figura 2-2 Capas de composición de un panel fotovoltaico. Tomado de DuPont. (2015) .....	9
Figura 2-3 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, en las categorías de cambio climático, toxicidad humana, y formación de oxidantes fotoquímicos. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson. (2013) .....	10
Figura 2-4 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, sobre las categorías de Ecotoxicidad marina y de agua dulce. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson. (2013)....	11
Figura 2-5 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, en las categorías de transformación de tierras naturales, y ocupación del suelo urbano y agrícola. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson, 2013.....	11
Figura 4-1 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el primer análisis realizado. ....	31
Figura 4-2 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el segundo análisis realizado.....	32
Figura 4-3 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el tercer análisis realizado.....	32
Figura 4-4 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la caja de conexiones (PPO) y su porcentaje de masa respectivo. ....	33
Figura 4-5 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la celda y su porcentaje de masa respectivo. ....	33
Figura 4-6 Elementos encontrados por el EDS en la muestra del encapsulante EVA y su porcentaje de masa respectivo. ....	34
Figura 4-7 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la cubierta posterior (PVF y PET) y su porcentaje de masa respectivo. ....	35
Figura 4-8 Elementos encontrados por el EDS en la muestra del contacto metálico y su porcentaje de masa respectivo. ....	35
Figura 4-9 Diagrama de flujo de la recuperación del panel fotovoltaico de silicio policristalino. ....	38
Figura 4-10 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.....	47
Figura 4-11 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	49
Figura 4-12 Fases del ciclo de vida del panel fotovoltaico de silicio policristalino. ....	52
Figura 8-1 Muestra del panel fotovoltaico de silicio policristalino. ....	63
Figura 8-2 Proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones del módulo fotovoltaico. ....	63
Figura 8-3 Medición del peso de la caja de conexiones en balanza del CIVCO. ....	64

Figura 8-4 Proceso de desmantelamiento del marco metálico del módulo fotovoltaico.....	64
Figura 8-5 Medición del peso del marco de aluminio en balanza del CTTM.....	65
Figura 8-6 Horno eléctrico utilizado para desmantelamiento del vidrio y la cubierta posterior del panel fotovoltaico. .....	65
Figura 8-7 Proceso de desmantelamiento del vidrio del módulo fotovoltaico.....	66
Figura 8-8 Vidrio separado del módulo fotovoltaico.....	66
Figura 8-9 Proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior del módulo fotovoltaico.....	67
Figura 8-10 Contacto metálico separado del módulo fotovoltaico. ....	67
Figura 8-11 Muestra del vidrio vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ....	68
Figura 8-12 Muestra de la caja de conexiones (PPO) vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ....	68
Figura 8-13 Muestra de la celda vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ....	69
Figura 8-14 Muestra del encapsulante EVA vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ....	69
Figura 8-15 Muestra de la cubierta posterior (PVF y PET) vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ..	70
Figura 8-16 Muestra del contacto metálico vista desde el microscopio a una resolución de 50 $\mu\text{m}$ . ....	70
Figura 8-17 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de cubierta frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales. ....	78
Figura 8-18 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida del marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales. ....	78
Figura 8-19 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de las capas intermedias de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales. ....	79
Figura 8-20 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta posterior de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales. ....	79
Figura 8-21 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la caja de conexiones de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales. ....	80
Figura 8-22 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	80
Figura 8-23 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida del marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	81
Figura 8-24 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de las capas intermedias de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	81
Figura 8-25 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta posterior de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	82
Figura 8-26 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la caja de conexiones de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	82
Figura 8-27 Evaluación de impacto ambiental de la fase de extracción, fabricación, transporte y uso de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales. ....	83

Figura 9-1 Distribución de la producción bruta de energía en Costa Rica (GWh) por tipo de fuente en el año 2015.

Elaborado por Instituto Costarricense de Electricidad. (2015).....94

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1 OBJETIVOS .....	4
1.1.1 <i>Objetivo General</i> .....	4
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
<b>2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 CICLO DE VIDA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO .....	5
2.1.1 <i>Tiempo de retribución energética</i> .....	6
2.1.2 <i>Emisiones de gases de efecto invernadero</i> .....	7
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO .....	7
2.2.1 <i>Capas de composición</i> .....	7
2.2.2 <i>Análisis de los componentes por peso e impacto ambiental</i> .....	9
2.3 SITUACIÓN ACTUAL RESPECTO A LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO EN LA FASE DE FIN DE VIDA ÚTIL .....	12
2.3.1 <i>Nivel Mundial</i> .....	12
2.3.2 <i>Costa Rica</i> .....	13
2.4 ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS .....	14
2.4.1 <i>Proceso de recuperación y desmantelamiento de paneles fotovoltaicos</i> .....	15
<b>3 METODOLOGÍA</b> .....	<b>18</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO .....	18
3.1.1 <i>Desmantelamiento del panel</i> .....	18
3.1.2 <i>Análisis físico/químico</i> .....	21
3.2 MATRIZ DE EVALUACIÓN .....	21
3.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	23
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>26</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CRISTALINO .....	26
4.1.1 <i>Desmantelamiento del panel</i> .....	26
4.1.2 <i>Análisis de los Materiales</i> .....	28
4.1.2.1 <i>Análisis Físico (Circuito de Materiales)</i> .....	28
4.1.2.2 <i>Análisis Químico (Aplicabilidad)</i> .....	30
4.2 MATRIZ DE EVALUACIÓN .....	36
4.2.1 <i>Evaluación de las diferentes alternativas de gestión por material</i> .....	36

4.2.2	<i>Alternativa y lugar de gestión seleccionado por material</i> .....	36
4.2.3	<i>Costo preliminar de gestión del panel fotovoltaico de silicio policristalino</i> .....	38
4.3	<b>ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA</b> .....	39
4.3.1	<i>Análisis del inventario</i> .....	39
4.3.2	<i>Evaluación del impacto</i> .....	46
4.3.2.1	Evaluación del impacto de la fase de fin de vida sin contemplar la recuperación de los materiales: Escenario Línea Base .....	47
4.3.2.2	Evaluación del impacto de la fase de fin de vida contemplando la recuperación de los materiales: Escenario Caso de Recuperación Propuesto.....	49
4.3.2.3	Significancia de la fase de fin de vida al ciclo de vida del producto .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>APÉNDICES</b> .....	<b>62</b>
	APÉNDICE 1. IMÁGENES DEL PROCESO DE DESMANTELAMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO POLICRISTALINO .....	63
	APÉNDICE 2. IMÁGENES DEL ANÁLISIS QUÍMICO REALIZADO A LOS MATERIALES EN EL MICROSCOPIO TABLETOP ..	68
	APÉNDICE 3. MATRICES DE EVALUACIÓN .....	71
	APÉNDICE 4. COSTOS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO EN COSTA RICA PARA EL MES DE MAYO DEL 2016.....	74
	APÉNDICE 5. CÁLCULO DEL IMPACTO POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (KWH) DURANTE EL PROCESO DE DESMANTELAMIENTO TÉRMICO DEL PANEL FOTOVOLTAICO .....	76
	APÉNDICE 6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN SIMAPRO PARA CADA CAPA ESPECÍFICA DE COMPOSICIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO POLICRISTALINO .....	78
	8.1.1 <i>Escenario Línea Base</i> .....	78
	8.1.2 <i>Escenario de Recuperación</i> .....	80
	APÉNDICE 7. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EN SIMAPRO PARA LAS FASES DE EXTRACCIÓN DE MATERIALES, FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y USO .....	83
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>84</b>
	ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES DEL PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO .....	85
	ANEXO 2. COSTOS DE RECUPERACIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO, SEGÚN PV CYCLE EN EL 2011.....	89
	ANEXO 3. DATOS DEL PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO POLICRISTALINO.....	90
	ANEXO 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HORNO ELÉCTRICO.....	91

ANEXO 5. DATOS PARA EL ANÁLISIS DE INVENTARIO DE ENTRADA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PANEL EN CHINA.....	92
ANEXO 6. MATRIZ ENERGÉTICA DE COSTA RICA EN EL AÑO 2015.....	94

## RESUMEN

La industria solar fotovoltaica ha crecido considerablemente en los últimos años y actualmente en Costa Rica no se cuenta con un plan de gestión de los residuos provenientes de un panel fotovoltaico. Por esta razón, se procedió a evaluar el perfil ambiental de recuperar un módulo según las alternativas de gestión disponibles en Costa Rica para el tratamiento de sus residuos. Para lograr esto, se desmanteló un panel fotovoltaico de la tecnología de silicio policristalino para poder caracterizar sus materiales. Una vez caracterizados los materiales, se realizó una matriz de evaluación con variables que consideran el punto de vista energético y ambiental. Según los resultados obtenidos en la matriz, se realizó un Análisis de Ciclo Vida en el software SimaPro, enfocándose en la etapa de fin de vida. El estudio muestra que la recuperación de los materiales contribuiría significativamente a la reducción del perfil ambiental del fin de vida de los módulos policristalinos. En total, la recuperación de los materiales reduciría el impacto potencial en el cambio climático de la fase de fin de vida de  $1.43\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$  a  $-49.3\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$  (reducción aproximada de  $-50.73\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ ) y en términos de combustibles fósiles (petróleo) de  $5.54\text{MJ/m}^2$  a  $-491.4\text{MJ/m}^2$  (reducción aproximada de  $-496.94\text{MJ/m}^2$ ). En Costa Rica se tienen instalados cerca de  $10544.24\text{m}^2$  de paneles fotovoltaicos para el año 2015, si se recuperara toda la capacidad solar fotovoltaica, el impacto en el cambio climático se reduciría en  $-534.91\text{tCO}_2 \text{ eq}$ , y el agotamiento de petróleo en  $-5.24\text{TJ}$ .

**Palabras Claves:** panel fotovoltaico, policristalino, reciclaje, co-procesamiento, relleno sanitario, Análisis de Ciclo de Vida, impacto ambiental.

## ABSTRACT

Within the last years, solar photovoltaic industry has grown considerably and currently Costa Rica does not have a waste management plan for photovoltaic panels. For this reason, the environmental profile of recovering a module according to the management alternatives arrangements available in Costa Rica for waste treatment was assessed. In order to achieve this, a polycrystalline silicon

based photovoltaic panel was dismantled to characterize its materials. Once the materials were characterized, an evaluation matrix was performed with variables that take into account the energy and environmental point of view. According to the results obtained in the matrix, a Life Cycle Assessment was performed in the SimaPro software, focusing on end-of-life phase. The study shows that the recovery of materials would significantly contribute to reduce the environmental profile of the end-of-life of polycrystalline modules. In total, the recovery of materials would reduce the potential impact on climate change in the end-of-life from 1.43kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> to -49.3kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (approximate reduction of -50.73 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>) and in terms of fossil fuels (oil) from 5.54MJ/m<sup>2</sup> to -491.4MJ/m<sup>2</sup> (approximate reduction of -496.94 MJ/m<sup>2</sup>). In Costa Rica there are installed near 10544.24m<sup>2</sup> of photovoltaic modules in the year 2015; if all the solar photovoltaic capacity were recovered, the impact in climate change would be reduced by -534.91t CO<sub>2</sub> eq, and fossil depletion by -5.24TJ.

**Keywords:** photovoltaic panel, polycrystalline, recycling, co-processing, landfill, Life Cycle Assessment, environmental impact

## 1 INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica es una energía renovable que está creciendo a nivel mundial y Costa Rica tiene mucho recurso y potencial. Muchos estudios han demostrado que la generación de electricidad fotovoltaica es una alternativa amigable con el ambiente en comparación con las tecnologías convencionales de producción de energía con combustibles fósiles. (Fraunhofer & GaBi, 2012) Actualmente la tecnología fotovoltaica mejor establecida y más utilizada es la de silicio cristalino, la cual ha representado aproximadamente el 80-85% de la capacidad de producción mundial de energía fotovoltaica de la última década. (Bekkelund, 2013) Se dice que para considerar que el módulo de silicio cristalino es sostenible a través de su ciclo de vida, se deben de tomar en cuenta aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero, la abundancia de la materia prima requerida, y su reciclaje una vez que este alcanza su vida útil. (Geerlig, 2015) Debido a que la expectativa de vida de esta tecnología es de 25-30 años, actualmente a nivel mundial el retorno de paneles utilizados es relativamente bajo, así como su proceso de reciclaje se encuentra todavía en investigación, pero se espera que haya un incremento significativo a partir del año 2020. Sin embargo, los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de paneles fotovoltaicos se enfocan principalmente en la producción y utilización de los sistemas fotovoltaicos, y no se está evaluando en detalle la fase de fin de vida; donde esta puede influenciar significativamente el perfil ambiental del módulo. (Fraunhofer & GaBi, 2012)

En Costa Rica no se fabrican paneles fotovoltaicos, pero si existen empresas distribuidoras a nivel de todo el país, teniéndose por lo tanto un importante rol en la fase de fin de vida de este producto. Sin embargo, actualmente no se cuenta en el país con ningún reglamento respecto al manejo de los residuos provenientes de un sistema fotovoltaico, a pesar de que existe el concepto de responsabilidad extendida del productor para los consumidores y productores de dichos sistemas, la Ley N<sup>o</sup> 8839 de gestión integral de residuos no cataloga a los residuos fotovoltaicos como un residuo de manejo especial y por lo tanto no le aplica el concepto de responsabilidad extendida del productor. Por esta razón, las empresas distribuidoras no cuentan con un plan de gestión; donde se estima que para el año 2042 en Costa Rica van a haber alrededor de 26000 módulos que van a alcanzar su vida útil y por ende requerir de una adecuada gestión. Es importante recalcar que existe un porcentaje de los módulos que se dañan antes de cumplir su vida útil; por lo que se asume un 1.50% de daños en los módulos nuevos (0.20% por pérdidas en la producción, 0.50% por daños

en transporte y 0.80% por pérdidas acumuladas en los primeros 2 años) y un 0.30% de daños en los sistemas ya instalados. (Muller, Konrad, Schlenker, & Wambach, s.f)

Basándose en procedimientos avanzados ya existentes en Europa para el reciclaje de paneles fotovoltaicos (específicamente la iniciativa europea PV Cycle), se determina que la gran mayoría de módulos pueden ser retornados al mercado como materiales valiosos, y en el caso de plásticos, ser energéticamente recuperados. En términos ambientales, el reciclaje de los módulos puede contribuir significativamente con una reducción en el perfil ambiental del todo su ciclo de vida. Utilizando el método de ACV, los beneficios ambientales debido al reciclaje de los paneles pueden ser cuantificados. (Held, s.f) Por esta razón, se le realizó una evaluación ambiental a un proceso de recuperación de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino en Costa Rica que fue previamente propuesto, para determinar así la contribución del proceso de recuperación al ciclo de vida del módulo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Evaluar el perfil ambiental del proceso de recuperación propuesto para un panel fotovoltaico de silicio policristalino una vez que este alcance su vida útil.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

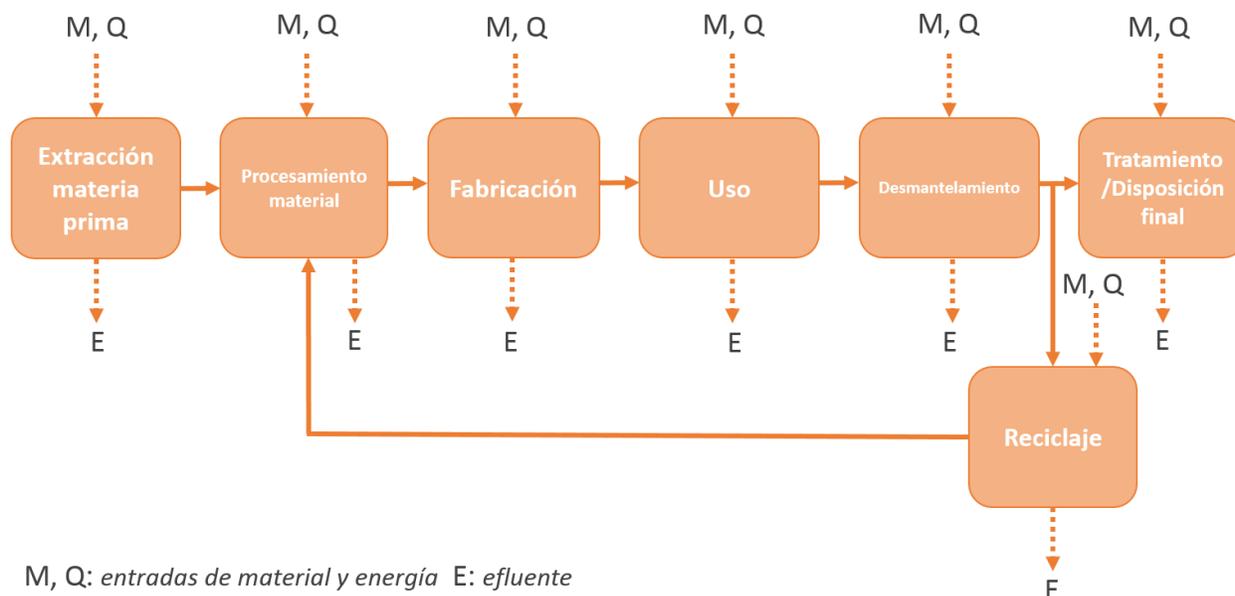
- Identificar la alternativa de gestión más adecuada en Costa Rica para el tratamiento de los residuos de un panel fotovoltaico de silicio policristalino.
- Analizar el impacto ambiental del escenario actual de disposición final de un panel fotovoltaico cristalino en Costa Rica, contra el escenario de recuperación propuesto en el proyecto.
- Determinar la contribución de la recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino a todo el ciclo de vida de este.

## **2 REVISIÓN BIBIOGRÁFICA**

### **2.1 Ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión ambiental para evaluar los impactos ambientales de un producto o el sistema de un producto (conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas) a través de todo su periodo de existencia. Esto involucra la cuantificación de todas las entradas de material y energía, así como las salidas de contaminantes y residuos durante las distintas etapas del ciclo de vida en estudio; esto desde la extracción de la materia prima y recursos hasta la gestión al final de la vida. Por lo tanto, se contabilizan los impactos directos e indirectos generados por el sistema del producto, de manera que mediante esta herramienta se pueda comparar el rendimiento ambiental de diferentes productos. (Bekkelund, 2013) Este se realiza mediante la ISO 14040 “Análisis del ciclo de vida-Principios y marco de referencia”, el cual es un documento marco que brinda información para la realización de un análisis de ciclo vida en términos de su principio y marco de referencia. Para las tecnologías comerciales de paneles fotovoltaicos los mayores indicadores de impacto durante su ciclo de vida son las emisiones de gases de efecto invernadero y el tiempo de retribución energética. (Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015) Para la realización de un ACV se recomienda utilizar una expectativa de vida de los módulos fotovoltaicos de 30 años para las tecnologías maduras (que estén compuestas por una cubierta frontal y posterior de vidrio-vidrio o vidrio-Tedlar respectivamente). (Fthenakis, Kim, Frischknecht, Raugei, et al, 2011)

En la Figura 2-1 se muestra el ciclo de vida de un panel fotovoltaico, el cual inicia con la extracción de la materia prima hasta la disposición o reciclaje y recuperación de los componentes de este. (Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015)



**Figura 2-1** Etapas del ciclo de vida de un panel fotovoltaico. Tomado de Fthenakis, Kim, Frischknecht, Raugei, et al. (2011)

La extracción de materia prima esta seguida por otras etapas de procesamiento y purificación, como lo es el caso de la arena de cuarzo utilizada para las celdas de silicio. La etapa de manufactura también se divide en varios pasos, los cuales son la oblea, celda y módulo; donde la etapa del módulo es la etapa en la cual las celdas son conectadas física y electrónicamente, y encapsuladas por vidrio y plástico. La fase de uso incluye la etapa de instalación del sistema. Por último al final de la vida útil, los sistemas fotovoltaicos son desmantelados y dispuestos, de la mano del reciclaje del material. (Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015)

### 2.1.1 Tiempo de retribución energética

Se define como el periodo requerido por un sistema de energía renovable para generar el mismo monto de energía (en términos de energía primaria equivalente) que fue utilizada para producir el sistema por sí solo. (Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015) Por lo tanto, se expresa el número de años que le tomó al sistema recuperar el consumo inicial de energía involucrado en su creación durante su ciclo de vida a través de su propia producción de energía. (Ito, 2011)

Se dice que en los paneles de silicio cristalino el mayor requerimiento de energético durante su ciclo de vida se refleja en la fusión y formación de las láminas cristalinas. La energía utilizada para módulos de silicio instalados en el techo se recupera en un tiempo de 1.7 y 2.7 años. (Ito, 2011)

### **2.1.2 Emisiones de gases de efecto invernadero**

Los gases de efecto invernadero (GEI) durante las etapas del ciclo de vida de un sistema fotovoltaico son estimados como un equivalente de CO<sub>2</sub> utilizando un horizonte de 100 años. Las emisiones principales de GEI son CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y clorofluorocarbonos (CFC) (Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015) Se dice que los paneles fotovoltaicos tienen un potencial de reducción de carbono, ya que la cantidad de CO<sub>2</sub> liberada durante su proceso de manufactura es mucho menor que el CO<sub>2</sub> evitado por la energía producida durante su vida útil. (Hegedus, & Luque, 2011)

Los módulos de silicio instalados en el techo tienen una huella de 30 a 45g CO<sub>2</sub> eq/ kWh, y esta es debido a la energía de combustibles fósiles consumida durante su manufactura. (Ito, 2011) Por esta razón se dice que los paneles son una excelente estrategia de mitigación de cambio climático, ya que así como la carga de CO<sub>2</sub> proveniente de fuentes de energía disminuye, va a disminuir también la cantidad de CO<sub>2</sub> por kWh. (Hegedus, & Luque, 2011)

Los gases de efecto invernadero provenientes de la electricidad fotovoltaica son de un 96 a 98% menores a los de la electricidad proveniente 100% de carbón, y un 92- 96% menor comparados a la matriz energética europea. (Bennett, Clyncke, Goris, & Olson, 2013)

## **2.2 Características del panel fotovoltaico de silicio cristalino**

La tecnología de silicio cristalino se divide en dos tipos, monocristalino y policristalino; donde el módulo policristalino constituye más de un 85% del mercado actual. Entre las especificaciones generales de este tipo de tecnología se tiene un peso total por módulo de 5-28 kg, una capacidad normal entre 120 y 300 Wp y un rango de dimensión típico de 1.4 a 1.7 m<sup>2</sup>, el cual puede llegar hasta 2.5 m<sup>2</sup>. (Hestin, & Monier, 2011)

### **2.2.1 Capas de composición**

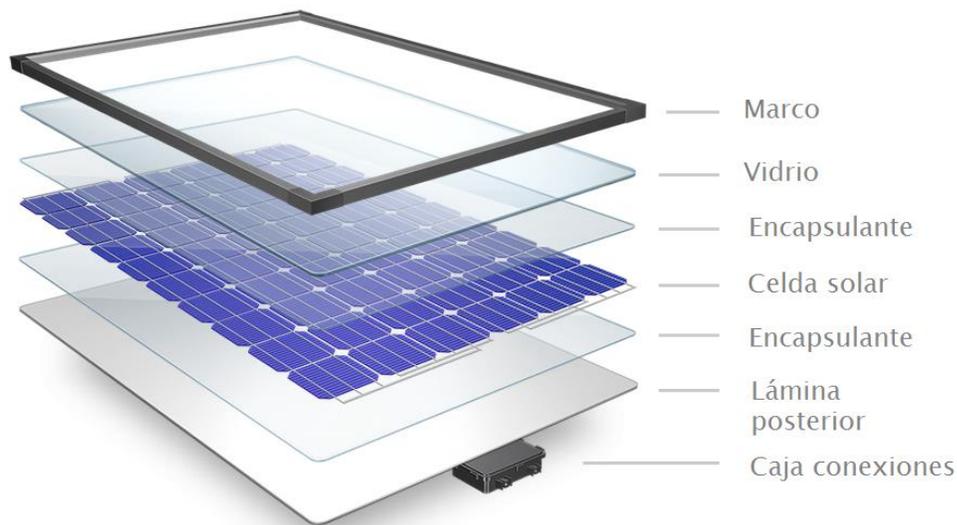
- *Cubierta frontal:* de vidrio templado de sosa, cal y sílice con un espesor entre 3 y 4 mm, con bajo contenido de hierro. Este tiene muy buena transmisión de la radiación solar, y

proporciona protección contra los agentes atmosféricos y los impactos. La superficie exterior del vidrio es anti reflexiva y esta tratada para impedir la retención del polvo y la suciedad. La superficie interior generalmente es rugosa, lo que permite una buena adherencia con el encapsulante de las células, además de facilitar la penetración de la radiación solar. (Castejón & Santamaría, 2010)

- *Encapsulante:* se emplean dos capas de Etil-Vinil-Acetato (EVA) entre la matriz de celdas. Este copolímero se encuentra en contacto directo con las células de manera que protege las conexiones entre las mismas y aporta resistencia contra las vibraciones e impactos. Además, permite la transmisión de la radiación solar y no se degrada con la radiación ultravioleta. (Castejón & Santamaría, 2010)
- *Celdas solares e interconexiones metálicas:* la conexión de las celdas de un módulo se realiza con cintas metálicas soldadas o incrustadas sobre la rejilla de conexión eléctrica de la cara frontal de cada celda. Estas cintas pueden ser de plata o aluminio. La interconexión entre celdas se realiza uniendo las cintas de la cara frontal (negativo) de una celda con la cara posterior (positivo) de la siguiente. (Castejón & Santamaría, 2010)
- *Cubierta Posterior:* se utiliza típicamente un laminado de tres capas. La capa externa es de polivinilo fluoruro (PVF, comercialmente denominado TEDLAR). Este, junto con la cubierta frontal, protege al módulo de la humedad y otros agentes atmosféricos, sin embargo no lo aísla eléctricamente.; para esto se utiliza una segunda capa de poliéster (Tereftalato de Polietileno). Para la parte interna se usa otra capa de TEDLAR. Este lámina de plástico de material compuesto es de naturaleza opaca, habitualmente de color blanco para reflejar la luz solar que no almacenan las celdas sobre la cara posterior rugosa de la cubierta frontal, la cual refleja la luz de nuevo hacia las celdas. (Castejón & Santamaría, 2010)
- *Marco:* la mayoría de los fabricantes utilizan aluminio anodizado. Esta estructura proporciona rigidez y resistencia mecánica al módulo, además de un sistema de fijación. (Castejón & Santamaría, 2010) El aluminio anodizado tiene excelente resistencia al

desgaste y la corrosión, ya que no es afectado por la luz solar. Además es químicamente estable, este no se descompone ni es tóxico. (TDA Anodizado S.A, s.f)

- *Caja de conexiones:* situadas en la parte posterior del módulo, habitualmente consiste en una caja estanca con una protección recomendada contra el polvo y el agua IP-65. Esta caja es fabricada con materiales plásticos (Óxido de Polifenileno) resistentes a las temperaturas elevadas, que en su interior incorpora los bornes de conexión positivo y negativo del módulo y los diodos de paso. (Castejón & Santamaría, 2010)



**Figura 2-2 Capas de composición de un panel fotovoltaico. Tomado de DuPont. (2015)**

En la Figura 2-2 se pueden observar con mayor claridad las capas que componen al módulo fotovoltaico.

En la sección de Anexos, Anexo 1. Características y propiedades de los componentes del panel fotovoltaico de silicio cristalino, se muestran las características y propiedades físicas y químicas de los componentes.

### **2.2.2 Análisis de los componentes por peso e impacto ambiental**

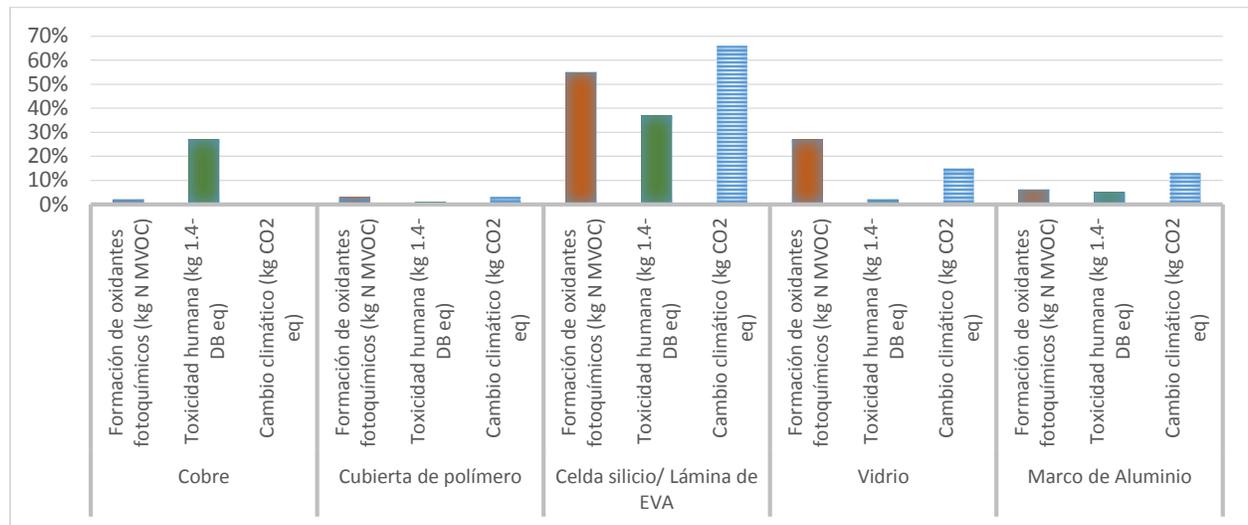
El promedio de composición por peso del típico módulo fotovoltaico de silicio cristalino se muestra en el siguiente cuadro, así como la energía integrada a cada componente (ver Cuadro 2-1)

**Cuadro 2-1 Porcentajes de composición por peso de los principales componentes del panel fotovoltaico cristalino**

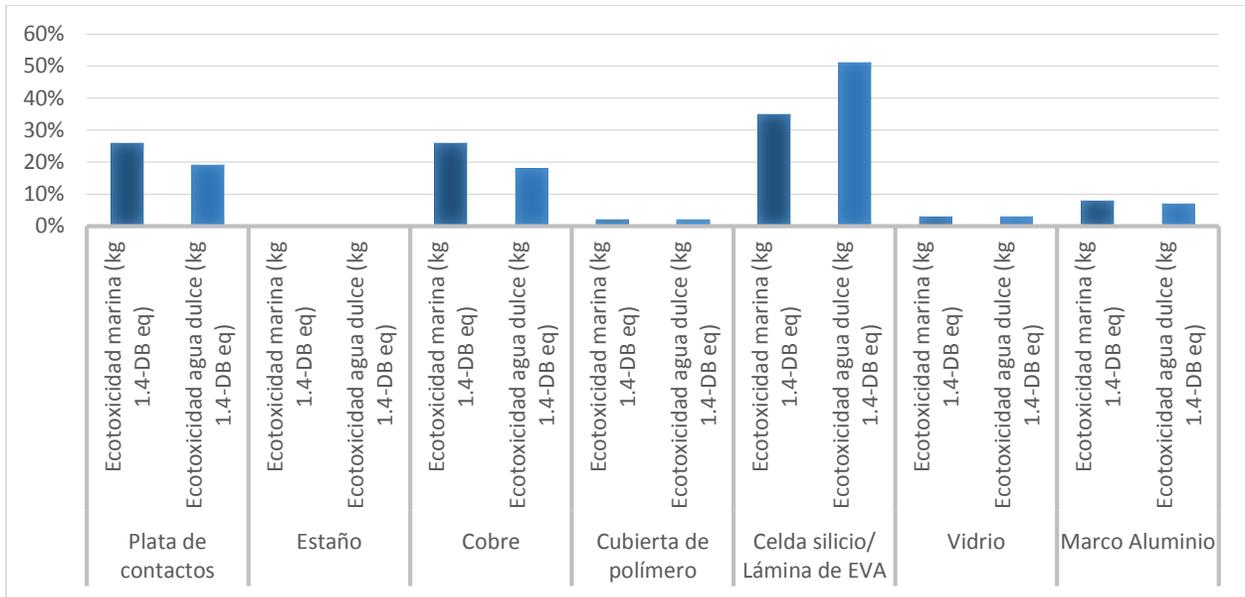
Materiales principales		Otros materiales	
Material	% Composición (wt)	Material	% Composición (wt)
Vidrio	74	Zinc	0.12
Polímeros	≈6.5	Plomo	<0.1
Celda silicio	≈3	Cobre	0.6
Marco de aluminio	10	Plata	<0.006

Tomado de (Dubey, Jadhav, & Zakirova, 2012).

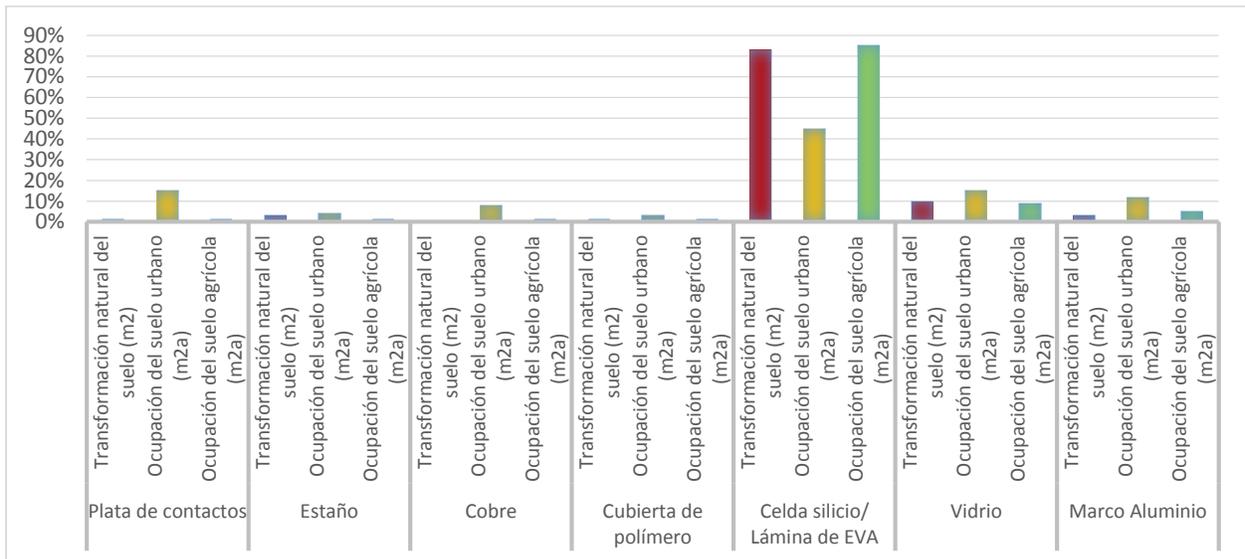
En la Figura 2-3, Figura 2-4 y Figura 2-5 se muestra el impacto ambiental de los materiales que componen un módulo fotovoltaico a través de su ciclo de vida para las categorías de impacto de cambio climático, toxicidad y niebla tóxica (“smog”), agua, y suelo respectivamente. Esto según el método de evaluación de impacto denominado ReCiPe.



**Figura 2-3 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, en las categorías de cambio climático, toxicidad humana, y formación de oxidantes fotoquímicos. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson. (2013)**



**Figura 2-4 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, sobre las categorías de Ecotoxicidad marina y de agua dulce. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson. (2013)**



**Figura 2-5 El impacto relativo de los componentes del módulo fotovoltaico, a través de su ciclo de vida, en las categorías de transformación de tierras naturales, y ocupación del suelo urbano y agrícola. Tomado de Bennett, Clyncke, Goris, & Olson, 2013**

## **2.3 Situación actual respecto a la gestión de los residuos de un panel fotovoltaico en la fase de fin de vida útil**

### **2.3.1 Nivel Mundial**

Muchos productores europeos ya están empezando a reciclar los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil, bajo los auspicio de la iniciativa voluntaria “PV Cycle”, y el Proyecto de Reglamento de la Unión Europea sobre el reciclaje de los módulos fotovoltaicos bajo el marco de “Waste Electrical and Electronic Equipment” (WEEE) (Boyle, 2012). PV Cycle fue fundada en el año 2007 como una asociación sin fines de lucro, y facilita la recolección y el reciclaje de celdas solares al final de su vida útil. La Asociación Europea es financiada completamente por productores e importadores, y el servicio es gratuito para todos aquellos que quieran disponer paneles fotovoltaicos, seguido de un desmontaje, sustitución o proyecto de renovación. La asociación ayuda a recuperar materiales como el vidrio, metales, plásticos y semiconductores, los cuales pueden ser utilizados en la producción de nuevos materiales y productos. (PV Cycle, 2013)

Desde el 13 de Agosto del 2012, la directiva de WEEE proporciona un marco legislativo a nivel europeo, respecto a la responsabilidad extendida del productor de paneles fotovoltaicos. A partir del 14 de febrero del 2015, la recolección, transporte y tratamiento (reciclaje) de los paneles es regulado en cada país de la Unión Europea. La meta de estas políticas es primero alentar a la industria a desarrollar productos que sean fáciles de reciclar y utilizar así menor materia prima, de manera que los productores tomen en cuenta el costo de la recolección y tratamiento de sus productos, al final de su vida útil, en el costo pagado por el consumidor. (Solar Waste, s.f)

Con respecto al costo de gestión de los paneles cristalinos, PV Cycle realizó una estimación según datos recogidos en el desmantelamiento de la planta belga de Chevetogne en 2009, tomando en consideración un escenario óptimo en el cual se recupera el 100% del aluminio, 95% del vidrio y el 30% de los metales raros. (HTWT, 2012) El balance neto de todo el proceso es de -1815€/t. En el Anexo 2. Costos de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio cristalino, según PV Cycle en el 2011, se puede observar con detalle el desglose de los costos.

En términos de la industria fotovoltaica en Estados Unidos, actualmente la compañía First Solar provee soluciones de reciclaje. (Fthenakis, 2015) El proceso de reciclaje de módulos de esta empresa consiste de las etapas de: recolección de los residuos, sistema de aspiración, trituradora, molino de martillos, eliminación de la película, separación sólido-líquido, precipitación, deshidratación, torta de filtro rico en metales, material de vidrio laminado, enjuague de vidrio y

limpieza del vidrio. El siguiente paso es la recuperación y la calidad del producto, aproximadamente un 90% del peso del módulo es recuperado, la mayoría es vidrio. (Krueger, s.f). En China, a pesar de ser el mercado más grande en el mundo de paneles fotovoltaicos, no hay ninguna política respecto del reciclaje de estos; por lo que la escala de reciclaje es pequeña. La tecnología se encuentra en investigación y desarrollo en laboratorios, y por lo tanto no se utiliza ningún equipo profesional para el reciclaje de los paneles. (Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, s.f)

Japón ha desarrollado investigación en el reciclaje de módulos fotovoltaicos, y su objetivo es el establecimiento de una tecnología de reciclaje para el tratamiento de grandes cantidades de los módulos al final de su vida útil, esto para el periodo del 2014 al 2018. Los aspectos y áreas en las que se están enfocando son el estudio de tecnologías de bajo costo para la eliminación, recogida y separación de los equipos del sistema fotovoltaico, el estudio y la demostración de tecnologías de bajo costo de reciclaje, así como la encuesta de las tendencias en el reciclaje de paneles. (Komoto, 2014)

### **2.3.2 Costa Rica**

El Reglamento de Generación Distribuida para Autoconsumo con Fuentes Renovables Modelo de Contratación Medición Neta Sencilla N°39220, establece en el artículo 16 y 19 como responsabilidades del productor-consumidor con un sistema de generación no interconectado e interconectado a la red que este debe "hacer una correcta disposición final de los residuos de los sistemas de generación y almacenamiento de la energía, en concordancia con la Ley N° 8839, Ley para la Gestión Integral de Residuos y Reglamento N° 37567-S MINAET-H, Reglamento General a la ley de Gestión Integral de Residuos." (MINAE & República, 2015) Sin embargo la Ley N° 8839 entre sus principios generales establece que los productores o importadores tienen la responsabilidad de gestionar su producto durante todo el ciclo de vida de este, incluyendo las fases posindustrial y pos consumo. El término "productor" incluye también al importador y distribuidor de los productos en el país, cuando estos no son fabricados en Costa Rica. Para efectos de esta ley, este principio se aplica únicamente a los residuos de manejo especial en los artículos 41 y 42. (Castro, 2012) Para respaldar esto, el Ministerio de Salud publicó el Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial N°38272-S, el cual define en el Anexo I una lista de 14 residuos declarados de manejo especial. En esta no se establecen los paneles solares como

residuo de manejo especial, ni tampoco se catalogan como residuos tipo electrónicos. (MINAE, MINSALUD & República, 2014)

A finales del año 2015, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) publicó que la energía solar fotovoltaica instalada en el país es de 6455 kW. (Lobo, 2015)

#### **2.4 Alternativas de gestión de residuos**

Las opciones de fin de vida para productos y materiales son el reuso de los productos o componentes en otras aplicaciones, reajuste de los componentes para reutilización en aplicaciones similares, reciclaje de los materiales para más utilización, incineración de materiales o la disposición de los materiales como desecho (relleno sanitario). Entre los beneficios ambientales que tienen el reciclaje de materiales es la sustitución de materiales primarios y para el aprovechamiento energético la sustitución de poder, calor o generación de vapor. Para el caso específico de paneles fotovoltaicos de silicio el reciclaje del vidrio tiene el beneficio de la sustitución de materia prima, evitar emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la reducción de carbón en la materia prima (ej. caliza), y la reducción energética en el proceso de fusión. En el caso del reciclaje del cobre y aluminio se tiene la sustitución de materiales primarios (reducción del impacto ambiental debido al procesamiento, por ejemplo en la fusión y refinado), y en el caso de los residuos de plástico, por incineración y aprovechamiento energético, se tiene una sustitución de generación energética. (Held, 2013).

La alternativa de gestión de los componentes de un panel fotovoltaico una vez que estos alcanzan su vida útil sería por lo tanto la recuperación de sus residuos. La recuperación consiste en el reprocesamiento de la materia prima para la obtención de nuevos productos. Existen cuatro tipos de recuperación, según el tipo de producto: reutilización, reciclado, valoración energética y recuperación química. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampeña, s.f)

- Reutilización: consiste en darle nueva utilidad, previo al acondicionamiento del mismo, radicando su mayor limitación en la cantidad máxima de ciclos de reutilización a los que puede ser sometido, ya que en cada uno de ellos el material sufre un proceso de degradación. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampeña, s.f)
- Reciclado: se basa en el reprocesamiento del material para la obtención de uno de menor valor; la calidad del material obtenido depende de la calidad del que ha sido reprocesado. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampeña, s.f) Los materiales residuales son transformados

mediante procesos fisicoquímicos para convertirlos en productos que vuelven al mercado. Los procesos de reciclaje dependen de cada tipo de material, y hay una diversidad muy grande de tecnologías de reciclaje. Es aplicable para vidrio, papel y cartón, plásticos, metales, maderas, escombros, trapos y cueros. La calidad de los productos resultantes depende del nivel de la tecnología aplicada y de la calidad de los procesos previos. Cuanta más energía sea necesaria para la extracción y purificación de los recursos naturales, más se justifican los procesos de reciclaje; Cuánto más altos sean los precios de las materias primas vírgenes, mayores posibilidades hay de que sea viable económicamente la implementación de procesos de reciclaje. (Secretaría de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y el Caribe, 2010)

- Valoración Energética: consiste en la recuperación de energía en forma de calor. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampena, s.f)
- Valoración Química: consiste en la recuperación de sustancias químicas sencillas. (Goldsmidt, Kim, Marcos & Pampena, s.f)

Según la ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos No. 8839, la gestión integral de residuos debe hacerse de acuerdo a un orden jerárquico establecido, donde primero se debe de reducir al máximo la generación de residuos en su origen, luego la reutilización de los residuos generados en la misma cadena de producción o en otro proceso, seguido de la valorización de los residuos por medio del reciclaje, el co-procesamiento, el resamblaje, o algún otro procesamiento técnico que permita la recuperación del material y su aprovechamiento energético. La ley establece que se debe de dar prioridad a la recuperación de materiales sobre el aprovechamiento energético. Si ya no se puede aplicar ninguna de las anteriores, se deben tratar los residuos generados antes en enviarles a la disposición final y por último la disposición de la menor cantidad de residuos, de manera sanitaria, así como ecológicamente adecuada. (Castro, 2012)

#### **2.4.1 Proceso de recuperación y desmantelamiento de paneles fotovoltaicos**

Con la tecnología actual se puede reciclar alrededor de un 80% del módulo en términos de peso. La demanda de energía para reciclar y reprocesar un módulo fotovoltaico de la tecnología basada

en silicio es de aproximadamente 200 kWh por módulo. Esta demanda de energía aplica para un módulo con  $160W_p$ , por lo que la energía requerida sería de aproximadamente 1.25 kWh por  $W_p$ ; donde el proceso de reciclaje por sí solo (contemplando el proceso de reciclaje de las celdas de silicio) requiere de alrededor de 90 kWh por módulo, o 0.6 kWh por  $W_p$ . Esto demuestra que la demanda energética para reciclar un panel es mucho menor que la energía necesaria para manufacturar un módulo nuevo; más de un 50% de la energía se puede ahorrar cuando estos se reciclan. (Dubey, Jadhav, & Zakirova, 2012).

Existen diferentes tratamientos y procesos de reciclaje realizados por las compañías recicladoras y productoras de paneles alrededor del mundo, así como existen centros que forman parte de PV Cycle y están constantemente realizando investigaciones en el tema del reciclaje, por ejemplo *Energy Research Center from Netherlands* (ECN) con el proyecto “Cradle-to-Cradle sustainable PV modules (CU-PV)”, y la estación minera SASIL y *Stazione Sperimentale del Vetro di Murano* (SSV) con el proyecto “Full Recovery End Of Life Photovoltaics (FRELP)”.

El proceso de recuperación de paneles fotovoltaicos de SASIL consiste en recibir el módulo, descargarlo y colocarlo en una cinta transportadora, seguidamente se desmantela el marco de aluminio y las conexiones eléctricas, para su recuperación inmediata colocándolas en contenedores separados. El panel (sin marco ni conexiones) se coloca en un horno de cámara con una atmósfera controlada (sin aire) a una temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$ , para la separación del vidrio del sándwich de EVA. El vidrio se transfiere limpio a un lugar de almacenamiento para su posterior reciclaje. Seguidamente se realiza una pirólisis en continuo para la gasificación del EVA, produciendo gas, gas-aceite y cenizas que consisten de silicio cristalino. El gas-aceite es utilizado como combustible en el ciclo de secado de SASIL y con el gas de alimentación del sistema de pirólisis. Se realiza un proceso de lixiviación ácida a alta temperatura de las cenizas de pirólisis que consisten en silicio cristalino y los contaminantes orgánicos y / o inorgánicos. Luego se realiza una electrólisis del líquido de nano-filtración para la recuperación de iones metálicos en solución mandatos del proceso de lixiviación y prefiltrado. Por último se recolecta y almacena el silicio purificado para su uso en el sector de metalurgia. (Lodovico, 2013)

Para el caso del SSV, las fases de desmantelamiento del panel consisten en medir y pesar los paneles, desprender la estructura metálica (marco de aluminio), luego tomar una muestra representativa para aplicarle el estudio (16x16 cm para cada panel). Seguidamente eliminan el vidrio mediante un tratamiento térmico a  $120^{\circ}\text{C}$ , y luego eliminan la capa posterior con otro

tratamiento térmico a 100°C. Para recuperar el silicio realizan una incineración del sándwich a una temperatura de 600°C por un periodo de una hora. (Hreglich, 2015)

El centro ECN tiene como método de reciclaje la remoción manual del marco de aluminio y la caja de conexiones. El módulo sin marco es insertado en un molino de martillos para su trituración, donde se va a separar en fragmentos de vidrio limpio y material de tabulación. Se recolecta el vidrio contaminado, granos de celdas solares y la cubierta posterior y se almacena en bolsas grandes o se vende como material de baja calidad. Para el caso de paneles que usen como encapsulante un termoplástico como sustituto del EVA (como propone el proyecto Cu-PV para mejorar la capacidad de reciclaje) el proceso de reciclaje consistiría, luego de extraído manualmente el marco de aluminio y la caja de conexiones, en calentar el módulo para suavizar el encapsulante, remover la capa posterior, remover con una espátula la mayor cantidad posible de encapsulante de la celda solar, y por último separar la celda del vidrio con una cuchilla. (Goris, 2014)

### **3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 Caracterización de los residuos de un panel fotovoltaico policristalino**

##### **3.1.1 Desmantelamiento del panel**

La muestra analizada fue 1 panel fotovoltaico (marca Yingli Solar, modelo YL245P-29b) de la tecnología silicio policristalino, ya que es el tipo de tecnología de mayor consumo a nivel nacional. En la sección de anexos, Anexo 3. Datos del panel fotovoltaico de silicio policristalino, se encuentra con mayor detalle las características del panel; así como en la sección de apéndice, Apéndice 1. Imágenes del proceso de desmantelamiento del panel fotovoltaico de silicio policristalino, se puede observar una imagen de este antes de ser desmantelado (ver Figura 8-1).

El método de desmantelamiento fue primero mecánico para extraer el marco de aluminio y la caja de conexiones, luego se hicieron pruebas por tratamiento térmico para ver cuál temperatura es más eficaz para separar el vidrio y el PVF/PET de las capas intermedias de EVA/silicio/EVA.

Con respecto al método térmico, la prueba consistió en colocar una muestra pequeña del panel sin marco de aluminio ni caja de conexiones en un horno eléctrico a distintas temperaturas. Esta prueba se realizó en el Taller de Materiales de la Escuela de Ingeniería en Materiales, con un horno eléctrico marca Precision Scientific Group, modelo 18EG/E (para más detalle del horno ver el Anexo 4. Especificaciones técnicas del horno eléctrico). Se monitoreo la temperatura directamente en la muestra, con ayuda de una termocupla, ya que esta es la temperatura que interesa, no la del horno. Cuando se alcanzó la temperatura deseada en la muestra, se procedió a separar las capas tanto de la cubierta frontal (vidrio) como la cubierta posterior (PVF y PET) con ayuda de una cuchilla y un alicate de punta, respectivamente.

Las temperaturas seleccionadas para realizar las pruebas se basaron en resultados positivos ya obtenidos por distintos centros de investigación de PV Cycle. En el caso de la cubierta posterior se realizaron las pruebas a una temperatura de 120° C (según ECN), así como a 100° C (según SSV). Para el caso de la cubierta frontal se usaron temperaturas de 150° C (según SASIL) y 120° C (según SSV). El silicio no se separó del EVA ya que para lograr esto se requiere de un proceso de gasificación a temperaturas elevadas (600° C), seguido de un tratamiento químico a las celdas. Esto requiere de un equipo y tecnología más avanzada, así como implica un mayor costo.

En el Cuadro 3-1, Cuadro 3-2 y Cuadro 3-3 se muestra con detalle las especificaciones del proceso de desmantelamiento para cada material que compone el panel, según el orden respectivo de desmantelamiento.

**Cuadro 3-1 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones y marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Capa de Composición</b>	<b>Método</b>	<b>Materiales requeridos</b>	<b>Equipo seguridad requerido</b>	<b>Procedimiento</b>
<b>Caja de conexiones</b>	Mecánico	Desatornillador plano y martillo	Guantes y anteojos	Colocar el panel en una mesa posición boca abajo. Con un desatornillador tipo plano ir desprendiendo los bordes de la caja de conexiones de la cubierta posterior. Con la ayuda de un martillo golpear la base del desatornillador. Seguidamente se debe pesar la caja de conexiones y el cableado.
<b>Marco metálico</b>	Mecánico	Espátula, martillo y segueta	Guantes y anteojos	Colocar el panel boca abajo. Con una segueta cortar los puntos de unión entre las piezas de aluminio, ubicadas en las cuatro esquinas del panel. Luego, con un martillo golpear la base de la espátula de manera que se va desprendiendo el marco de la cubierta posterior. Seguidamente se debe pesar las cuatro piezas que conforman el marco.

**Cuadro 3-2 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior y frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Capa de Composición</b>	<b>Método</b>	<b>Materiales requeridos</b>	<b>Equipo seguridad requerido</b>	<b>Procedimiento</b>
<b>Cubierta Posterior</b>	Térmico	Cuchilla, pinzas, alicate de punta plana, termocupla y horno eléctrico	Guantes, anteojos y gabacha	Colocar una muestra de panel (vidrio, EVA, silicio, PVF/PET) en el horno a una temperatura previamente definida, y con ayuda de una sonda de termocupla regular la temperatura directamente en la muestra. Se debe dejar la muestra hasta que esta alcance la temperatura deseada. Cuando se alcance la temperatura en la muestra, esta se extrae del horno, con el uso de pinzas, y con una cuchilla se hace en una esquina un punto de partida. Paralelamente otra persona va desprendiendo con el alicate de punta plana la cubierta posterior conforme esta se va pelando.
<b>Cubierta Frontal</b>	Térmico	Cuchilla, pinzas, termocupla y horno eléctrico	Guantes, anteojos y gabacha	Colocar una muestra de panel (EVA, silicio, PVF/PET) en el horno a una temperatura previamente definida, y con ayuda de una sonda de termocupla regular la temperatura directamente en la muestra. Se debe dejar la muestra hasta que esta alcance la temperatura deseada. Cuando se alcance la temperatura en la muestra, esta se extrae del horno, con el uso de pinzas, y con una cuchilla se va despegando el vidrio de la superficie de EVA.

**Cuadro 3-3 Especificaciones respecto al proceso de desmantelamiento de los contactos metálicos de un panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Método</b>	<b>Materiales requeridos</b>	<b>Equipo seguridad requerido</b>	<b>Procedimiento</b>
Mecánico (manual)	Pinzas	Guantes y anteojos	Se extraen los contactos de aluminio de la capa remanente de EVA y silicio con ayuda de las pinzas.

### 3.1.2 Análisis físico/químico

Una vez desmantelado el módulo, se le hicieron análisis físicos y químicos a los distintos residuos para determinar ciertas variables. Las variables analizadas para la evaluación, tomando en consideración el punto de vista energético y ambiental, fueron las siguientes:

- Circuito de materiales: evalúa la capacidad de recuperar los materiales originales a partir de los desechos, considerando tanto la cantidad como la calidad del material obtenido.
- Aplicabilidad: se contempla el potencial uso del material resultante teniendo en cuenta su facilidad de aplicación.
- Impacto Ambiental: se evalúan los efectos desfavorables que el proceso de gestión analizado tiene sobre el ambiente, considerando los productos obtenidos en cada caso.

El análisis físico consistió de una medición de la calidad del residuo antes y después del proceso de desmantelamiento y separación; esto para cuantificar la variable de circuito de materiales. Para la calidad se analizó el estado físico y la apariencia del material, para poder así determinar qué tanto se puede recuperar el material original a partir del residuo.

Por otro lado, realizó un análisis químico a los residuos para cuantificar la variable de aplicabilidad. Se realizaron, por medio de Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS), mediciones de presencia de metales pesados en ciertos residuos para determinar si estos cumplían con los requerimientos para ser co-procesados y/o reciclados. Se realizaron los análisis a muestras pequeñas de cada material en el Laboratorio Institucional de Microscopía del TEC con un microscopio Hitachi Tabletop Microscope (modelo TM-1000).

La variable de impacto ambiental se determinó mediante la jerarquización en la gestión integral de residuos establecida en el artículo 4 de la Ley No. 8839. El método de jerarquización lo que establece es que la gestión integral de residuos debe de hacerse de acuerdo a un orden jerárquico; donde el objetivo de este es conseguir el máximo beneficio práctico de los productos y en general la mínima cantidad posible de residuos.

### 3.2 Matriz de Evaluación

Se realizó una matriz de evaluación con las alternativas de gestión disponibles para cada residuo del panel fotovoltaico a nivel país, esta matriz se basó en un estudio similar realizado por la Universidad Técnica Nacional de Buenos Aires, Argentina. Para completar la matriz se realizó una investigación bibliográfica y se consultó con expertos. Los residuos analizados fueron aluminio,

vidrio, Óxido de Polifenileno, Etil Vinil Acetato, silicio, y Polivinilo de Fluoruro/Tereftalato de Polietileno. A continuación se muestra la matriz realizada (

Cuadro 3-4).

**Cuadro 3-4** Machote de la matriz de evaluación que se le aplicó a los materiales de un panel fotovoltaico de silicio policristalino

Alternativa de Gestión	Circuito de Materiales	Aplicabilidad	Impacto Ambiental	Total
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>			
<b>Recuperación</b>	<i>Reutilización</i> <i>Reciclado</i> <i>Valoración</i> <i>Energética</i>			

Para analizar los resultados de la matriz de evaluación se estableció una escala del 0 al 5 para cada una de las variables; de manera que al completar la matriz se sumaron las casillas y la alternativa que tenía la mayor puntuación fue la elegida. Este procedimiento se realizó para cada uno de los residuos del panel. A continuación se detallan las escalas utilizadas para cada variable.

- **Circuito de materiales:** la puntuación mínima (0) equivale al proceso incapaz de recuperar el material original, y la puntuación máxima (5) al proceso de gestión que representa la máxima capacidad de recuperar el material original.
- **Aplicabilidad:** la puntuación mínima (0) equivale a aquellos materiales que no tienen aplicación, y la puntuación máxima (5) a la mayor aplicabilidad.
- **Impacto ambiental:** la puntuación mínima (0) equivale al proceso que produce los efectos más desfavorables sobre el ambiente, y la puntuación máxima (5) al proceso de gestión que produce los efectos menos desfavorables sobre el ambiente.

Según la jerarquización de la gestión de residuos, la escala a utilizar es la siguiente: reutilizar 5, reciclar 4. Co-procesar 3, pretratamiento físico-químico 2 y relleno Sanitario

### 3.3 Análisis de ciclo de vida

Se realizó un análisis del ciclo de vida del panel fotovoltaico policristalino enfocándose en la etapa final de este. Esto se realizó con ayuda del software SimaPro (versión 8.1.1) y la base de datos Ecoinvent 3.1 (allocation, default- unit). Se usó como referencia el estándar internacional ISO 14040:2007 (Análisis del ciclo de vida-Principios y marco de referencia), donde el estudio está compuesto por cuatro fases:

1. Definición del objetivo y el alcance
2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)
4. Interpretación

Las fases 2 y 3 se definen en la sección de resultados y discusión y la fase 4 en la sección de las conclusiones.

#### Definición del alcance

- a) Unidad funcional: 1m<sup>2</sup> de panel.
- b) Flujo de referencia: 136Wp/m<sup>2</sup> y 37.6 celdas/m<sup>2</sup>
- c) Límites del sistema: El estudio se limitó a paneles fotovoltaicos fabricados en China, ya que es el país fabricante de paneles del cual más se importa en Costa Rica; así como de la tecnología tipo silicio policristalino.

Los procesos unitarios y flujos incluidos en el sistema son los siguientes:

- Fabricación del panel: entradas de materia prima, materiales auxiliares, energía (electricidad y calor), transporte de materiales y agua.
- Transporte del producto final: proceso de transporte.
- Fase de uso: producción de electricidad por los 30 años de vida útil
- Fin de vida: desmantelamiento del panel, escenario de recuperación (reutilización, reciclado y aprovechamiento energético) o disposición de los materiales. Los procesos de transporte y electricidad.

Los procesos unitarios y flujos que no se consideraron en el ACV son:

- Fabricación del panel: la disposición de los desechos del proceso de fabricación.
- Fase de uso: el mantenimiento y la desinstalación del panel.

Al ser los paneles fotovoltaicos importados a Costa Rica, la fase de fabricación no tiene impacto en Costa Rica; mientras que la fase final si tiene un impacto directo en el país. Por esto el ACV se enfocó en la fase de fin de vida, específicamente en la gestión de los residuos.

La evaluación se realizó para dos casos: el escenario propuesto en el proyecto (recuperación del panel fotovoltaico) y el escenario de línea base (sin recuperación del panel fotovoltaico, solo disposición), de manera que se analizaron ambos casos.

- d) Procedimientos de asignación (allocation): Se realizó una asignación según la matriz energética de Costa Rica para el año 2015.
- e) Categorías de impacto y metodología de evaluación de impacto seleccionada: La metodología de evaluación de impacto seleccionada para este proyecto fue *ReCiPe midpoint (H)* y la normalización *World ReCiPe H*.

Con respecto a la selección de las categorías de impacto, se seleccionaron las categorías de cambio climático, acidificación terrestre, eutrofización marina y de agua dulce, formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de combustibles fósiles.

- f) Requisitos relativos a los datos: Los datos utilizados para el ICV no sobrepasan los 6 años de antigüedad. Los datos referentes a la fase de fabricación fueron tomados del inventario proporcionado por la *International Energy Agency* (IEA) en el reporte del año 2012, específicamente para China.

Por otro lado, el cálculo de los datos de transporte del producto final hasta Costa Rica, la energía producida en la fase de uso y los escenarios de gestión de materiales de la fase de fin de vida se realizaron con el uso de una hoja de cálculo en Excel diseñada para este fin (está calculadora se basó en la proporcionada en el Decatlón Solar). Para el cálculo de las distancias recorridas en camión se hizo uso de la herramienta *Google Maps*, y para el caso del recorrido en barco se usó la página web *Sea Rates*, con su aplicación *Port Distances*. Con respecto a los cálculos de fin de vida útil, se utilizaron los resultados obtenidos en las matrices de evaluación respecto a las alternativas de gestión de los materiales.

Para los datos de reciclaje, incineración, y disposición se utilizó la base de datos de Ecoinvent 3.1.

g) Suposiciones: se asumió una expectativa de vida del panel fotovoltaico de 30 años, basándose a partir del reporte “Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity” de la IEA del año 2011.

El lugar de instalación del panel sería la sede de Cartago del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y el centro de desmantelamiento del panel se consideró que es el Centro de Transferencia y Transformación de Materiales (CTTM), ya que este pertenece al ITCR. El CTTM se encuentra ubicado en el Parque Industrial de Cartago.

Para las distancias recorridas en los procesos de transporte, se asumió la ruta que las herramientas utilizadas determinaron como óptima. También se tomó el puerto marítimo en China más cercano a la planta de fabricación del panel.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización de los residuos de un panel fotovoltaico cristalino

#### 4.1.1 Desmantelamiento del panel

La muestra analizada se encontraba dañada, específicamente con el vidrio quebrado debido a una caída durante su instalación. Esta fue donada por la empresa costarricense de energía solar “Enertiva”.

El día 5 de noviembre del 2015 se realizaron pruebas para desmantelar la caja de conexiones y el marco metálico en el CTTM con ayuda del encargado Juan Carlos Salas (ver Figura 8-2, Figura 8-3, Figura 8-4 y Figura 8-5 en el Apéndice 1. Imágenes del proceso de desmantelamiento del panel fotovoltaico de silicio policristalino). En el Cuadro 4-1 se muestra con detalle los resultados obtenidos.

**Cuadro 4-1 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones y el marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino**

Capa de Composición	Tiempo	Número de personas	Peso (kg)	% Composición (peso·100/peso total)
Caja de conexiones	30 s	1	0.3294	1.78
Marco metálico	12 min y 30 s	2	1.5 (4 estructuras)	1.78

Se cortó un pedazo de la estructura sin marco, con una dimensión aproximada de dos celdas de silicio, para hacerle las pruebas necesarias para separar la cubierta frontal y posterior de las capas intermedias de EVA y silicio. Estas pruebas se realizaron del mes de enero al mes de abril del año 2016 (ver Cuadro 4-2y Figura 8-6, Figura 8-7, Figura 8-8 y Figura 8-9). Las dimensiones internas del horno utilizado son de 36 cm de fondo, 45 cm de ancho y 48 cm de alto.

**Cuadro 4-2 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior y cubierta frontal de dos celdas de panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Capa de Composición</b>	<b>Prueba a temperatura A</b>	<b>Prueba a temperatura B</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Número de personas</b>
<b>Cubierta Posterior</b>	A=100° C. Se obtuvieron resultados positivos. Sin embargo la cubierta se desprendió con dificultad y el EVA no se fundió por completo. Se observaron secciones en las cuales no se separó la capa de EVA/silicio de la superficie de la cubierta.	B=120° C. Se obtuvieron resultados positivos. La cubierta se desprendió con mucha facilidad. Se observaron secciones en las cuales existe una capa de EVA aún adherida a la superficie de la cubierta.	Aproximadamente 1 h (en el horno) y 5 min	2
<b>Cubierta Frontal</b>	A=120° C. Se obtuvieron resultados positivos. Los pedazos de vidrio se desprendieron con facilidad. Se observó en su gran mayoría libres de EVA y silicio.	B=150° C. Se obtuvieron resultados positivos. Los pedazos de vidrio se desprendieron con mucha facilidad. Se observó en su gran mayoría libres de EVA y silicio.	Aproximadamente 1 h (en el horno) y 3 min	1

Una vez que se logró separar el vidrio y la cubierta de PVF y PET, se procedió a extraer los contactos metálicos que se encuentran adheridos a las celdas de silicio. Los resultados del tiempo y número de personas requeridas se pueden observar en el Cuadro 4-3 y en la Figura 8-10.

**Cuadro 4-3 Resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento de los contactos metálicos de un panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Tiempo</b>	<b>Número de Personas</b>
30 min	1

Durante el desmantelamiento del panel fotovoltaico se encontraron una serie de desventajas que dificultaron el proceso. A continuación se enlistan dichas desventajas:

- El marco de aluminio de la gran mayoría de los módulos (y específicamente del módulo analizado) está adherido con goma para evitar que penetre la humedad; por lo que es más

fácil dismantelar los paneles que traen el marco de aluminio atornillado y no pegado con goma.

- El EVA es sumamente difícil de manipular y este queda adherido a la lámina posterior y al silicio.
- Al calentarse el silicio en el horno, este se quiebra y por ende no es viable su reutilización.

Al obtenerse resultados positivos a una temperatura de 120°C para ambas capas (tanto la cubierta frontal como posterior), donde estas se desprenden con facilidad, se determina que la temperatura ideal para el tratamiento térmico es de 120°C. De esta manera se introduce el panel al horno una única vez, y cuando se alcanza esta temperatura en la muestra, se procede a separar tanto el PVF/PET como el vidrio. La cubierta posterior se debe separar primero, seguido de la cubierta frontal.

Se estima que el tiempo total de dismantelamiento de un panel fotovoltaico de 1.6335m<sup>2</sup> (60 celdas y 250W) es de aproximadamente 5 horas y 43 minutos con dos personas (donde habría un trabajador fijo que trabajaría las 5 horas y 43 minutos y otro que trabajaría solo 2 horas con 42 min), esto según las pruebas realizadas en esta investigación. Cabe recalcar que este tiempo podría disminuir significativamente si el proceso de dismantelamiento lo realizan personas con mayor experiencia.

#### **4.1.2 Análisis de los Materiales**

##### **4.1.2.1 Análisis Físico (Circuito de Materiales)**

###### *Aluminio*

El marco de aluminio sufrió un poco de deterioro luego del proceso de dismantelamiento, ya que se dificulta su separación debido a la goma que lo mantiene adherido. Por esta razón quedó un poco doblado en las partes en las cuales se utilizó la espátula para separarlo de la superficie del panel. Esto no altera el proceso de reciclaje, y por el contrario cumple los requerimientos de calidad. Sin embargo su calidad para reutilizarse disminuye al verse deformado luego del dismantelamiento. Para la disposición en el relleno su apariencia física abarca gran volumen, por esto habría que compactarlo previamente. En el proceso de dismantelamiento no hubo pérdidas de material.

### *Vidrio*

Luego del proceso de desmantelamiento, el vidrio quedó en fragmentos de aproximadamente 4 mm de longitud, lo cual es conocido como calcín. En términos de cantidad, se asume un 2% de pérdidas durante el proceso. Para su reciclaje, co-procesamiento o disposición final en el relleno sanitario no importa el estado físico del vidrio, y por el contrario que se encuentre triturado es ventajoso, por lo que el residuo si cumple los requerimientos de calidad, así como de cantidad. En el caso de reutilización, al estar el vidrio fragmentado, su apariencia física no es la ideal.

### *Óxido de Polifenileno (PPO)*

La caja de conexiones se separó manualmente, donde está no sufrió ningún daño físico más que rayones, y se recuperó todo el material. Para su disposición en el relleno su apariencia física puede ser difícil de compactar. Para su recuperación por co-procesamiento su estado físico no es de importancia y se cumple con los requerimientos.

### *Silicio*

Las celdas de silicio se quiebran luego del tratamiento térmico. Además, estas quedan con restos de EVA. Durante el desmantelamiento no hay pérdidas de material. La apariencia física no es relevante para su disposición en el relleno sanitario ni para su reciclaje, sin embargo si para su reutilización.

### *Etil Vinil Acetato (EVA)*

El EVA no se puede separar por sí solo bajo el método térmico, este se queda pegado ya sea en el silicio o en la cubierta posterior. La apariencia física del EVA no es un requisito para ser dispuesto en el relleno sanitario ni para su aprovechamiento energético, sin embargo al estar adherido tanto a la cubierta posterior como el silicio, su tratamiento se ve limitado.

### *Polivinilo de Fluoruro (PVF) y Tereftalato de Polietileno (PET)*

Luego del tratamiento térmico se separa la cubierta posterior del resto de la capa intermedia, donde algunas partes de la cubierta pueden quedar con restos de EVA. La cantidad de la cubierta no se ve alterado, solamente algunas secciones de la lámina pueden verse rayadas. Para su valoración energética o disposición no importa su apariencia física.

### *Contactos Metálicos*

Los contactos metálicos luego de desmantelado el panel se encuentran en su tamaño original, solamente un poco doblados; por lo tanto no se ve afectada la cantidad. Para su reciclaje o disposición no importa su apariencia física, así como su volumen no es un problema.

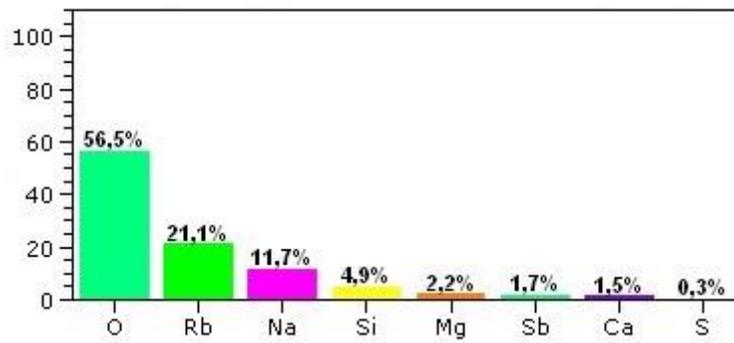
#### **4.1.2.2 Análisis Químico (Aplicabilidad)**

Se le realizó un EDS a los materiales a los cuales se les quería comprobar su composición química, ya que para ciertos tratamientos, como es el caso del co-procesamiento y el reciclaje (específicamente del vidrio), el material no puede tener rastros de metales pesados. En el

Apéndice 2. Imágenes del análisis químico realizado a los materiales en el microscopio Tabletop, se pueden observar a manera de imagen las muestras analizadas en el microscopio a una resolución de 50µm. Es importante recalcar que este análisis es más cualitativo que cuantitativo, ya que no da resultados exactos de composición.

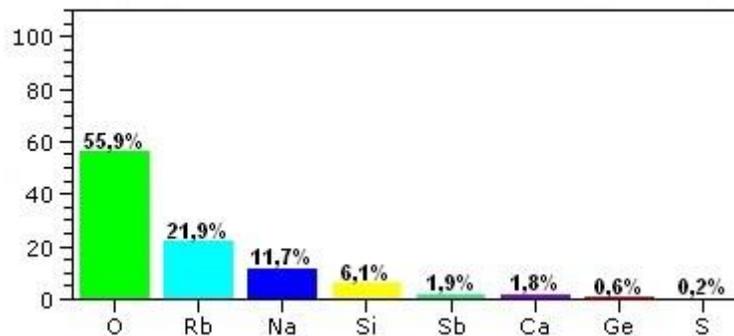
### Vidrio

Se analizaron dos muestras de vidrio de 3 y 4 mm de longitud con el Tabletop Microscope el día 28 de setiembre del 2015. Se realizaron tres análisis en total. En las Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3 se pueden observar los resultados obtenidos.



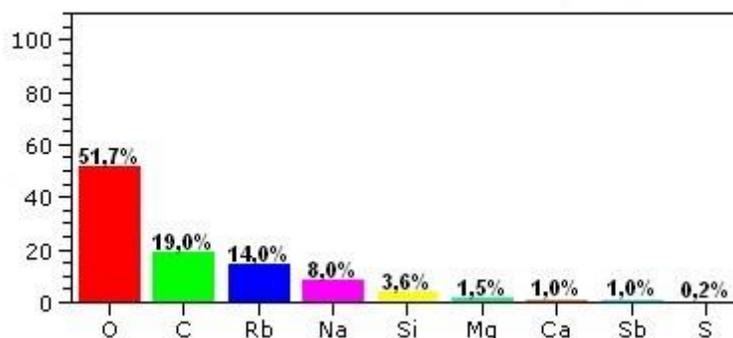
**Figura 4-1 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el primer análisis realizado.**

Como se puede observar en el primer análisis realizado (ver Figura 4-1), la muestra de vidrio está compuesta de 7 elementos. Los elementos son rubidio, sodio, silicio, magnesio, antimonio, calcio y azufre; el oxígeno no se toma en cuenta en los resultados debido a que se asocia a una capa superficial de oxidación presente en el vidrio. El elemento con mayor porcentaje de masa es el rubidio con 21.12%, y el menor es azufre con 0.34%.



**Figura 4-2 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el segundo análisis realizado.**

El gráfico anterior muestra los resultados del segundo análisis realizado (ver Figura 4-2), donde se detectó la presencia también de 7 elementos. Los elementos son rubidio, sodio, silicio, antimonio, calcio, germanio y azufre. En este análisis no se detectó la presencia de magnesio, y por el contrario si de germanio, pero en una cantidad muy pequeña. El rubidio tiene el mayor porcentaje de masa (21.85%), y el azufre el menor (0.21%)



**Figura 4-3 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de vidrio y su porcentaje de masa respectivo, para el tercer análisis realizado.**

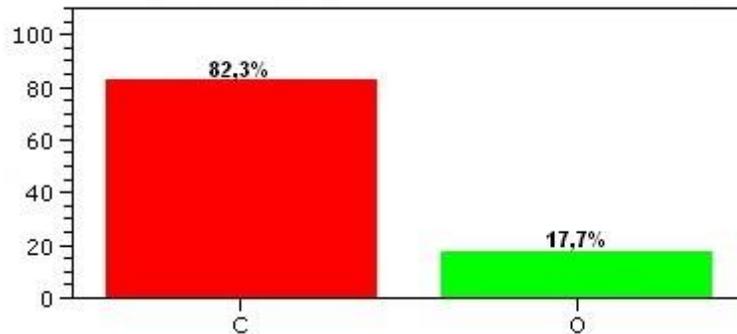
En el tercer análisis realizado (ver Figura 4-3), los elementos detectados fueron 8, los cuales son carbono, rubidio, sodio, silicio, magnesio, calcio, antimonio y azufre. A diferencia del primer y segundo análisis hay presencia de carbono en un alto porcentaje (19.05%), el cual se debe al material de la placa en la cual se coloca la muestra para ser analizada, y hay presencia de magnesio y no de germanio. Nuevamente el elemento con mayor masa fue el rubidio (14.0%) y el de menor masa fue el azufre (0.20%).

En los tres análisis realizados no se detectó presencia de metales pesados en la muestra de vidrio, determinándose entonces que el vidrio si cumple los requerimientos necesarios para ser reciclado o co-procesado. Para el caso de su disposición no se ocupa analizar la composición del vidrio, y este tipo de residuo si se acepta en el relleno sanitario.

### *Óxido de Polifenileno (PPO)*

Se realizó un análisis con una muestra de la caja de conexiones (PPO) el día martes 01 de marzo, mediante un EDS. La fórmula molecular del Óxido de Polifenileno es  $(C_8H_8O)_n$ , por lo que dicho

termoplástico está compuesto de moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno. En el microscopio se obtuvo lo mostrado en el siguiente gráfico (Figura 4-4).

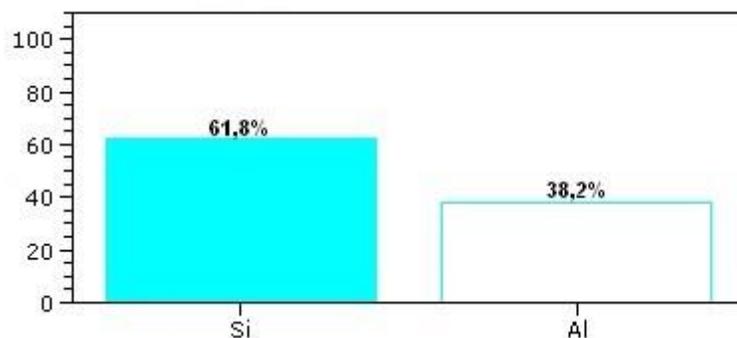


**Figura 4-4 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la caja de conexiones (PPO) y su porcentaje de masa respectivo.**

Se detectó un porcentaje de masa de 82.3% de carbono, el cual es la molécula que más aporta junto con el hidrógeno. De oxígeno se encontró un composición de 17.7%. No se observa presencia de metales pesados, por lo que sí se podría co-procesar este residuo. En el caso de su disposición en el relleno sanitario, este si acepta residuos plásticos.

### *Silicio*

Se realizó un análisis con una muestra de celda en el laboratorio de Nanotecnología el día martes 16 de febrero.



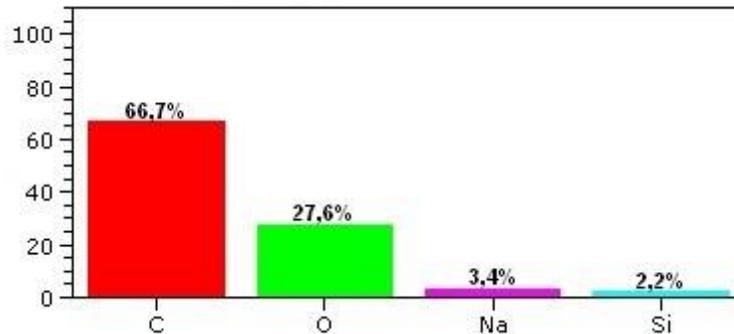
**Figura 4-5 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la celda y su porcentaje de masa respectivo.**

El gráfico anterior (Figura 4-5) muestra el resultado obtenido en el análisis. La celda policristalina está compuesta únicamente por dos elementos: silicio y aluminio. El silicio en una proporción de 61.8% y el aluminio en 38.2%. La presencia de aluminio se debe a la contaminación de la celda

con el contacto metálico, el cual contiene aluminio. La celda no cuenta con la presencia de ningún metal pesado.

#### *Etil Vinil Acetato (EVA)*

El análisis de la muestra de EVA se realizó el día 01 de marzo. La fórmula química del EVA es  $(nC_6H_{10}O_2)$ , donde solo presenta moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno. El resultado obtenido del EDS es el siguiente (ver Figura 4-6):

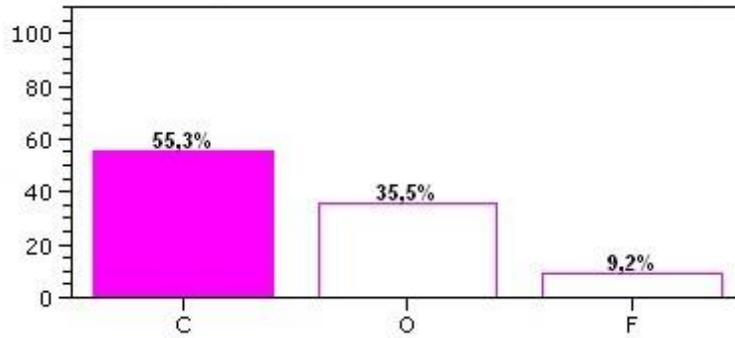


**Figura 4-6 Elementos encontrados por el EDS en la muestra del encapsulante EVA y su porcentaje de masa respectivo.**

En la composición de masa de la muestra se encontró presencia de carbono, oxígeno, sodio y silicio. El silicio se encuentra en una cantidad muy pequeña (2.2%) y se debe a muestras de la celda de silicio que se quedaron adheridas al EVA luego del proceso de desmantelamiento y separación de las capas intermedias. El carbono tiene la mayor composición (66.7%), seguido del oxígeno (27.6%). Se observa también la presencia de sodio en pequeñas cantidades (3.4%), sin embargo no se sabe la razón de la procedencia de este elemento. No se encontró presencia de metales pesados en el EVA, por lo que si cumple los requerimientos para ser co-procesado.

#### *Polivinilo de Fluoruro (PVF) y Tereftalato de Polietileno (PET)*

Se realizó un EDS con una muestra de la cubierta posterior el día martes 01 de marzo. Analizando la fórmula química del Polivinilo de Fluoruro, la cual es  $(C_2H_3F)_n$  y del Tereftalato de Polietileno  $(C_{10}H_8O_4)_n$ , se sabe que ambos están compuestos por moléculas de carbono, hidrógeno, oxígeno y flúor. Cabe recalcar que al ser el hidrógeno un elemento muy liviano, este no es identificado por el microscopio TM-1000.

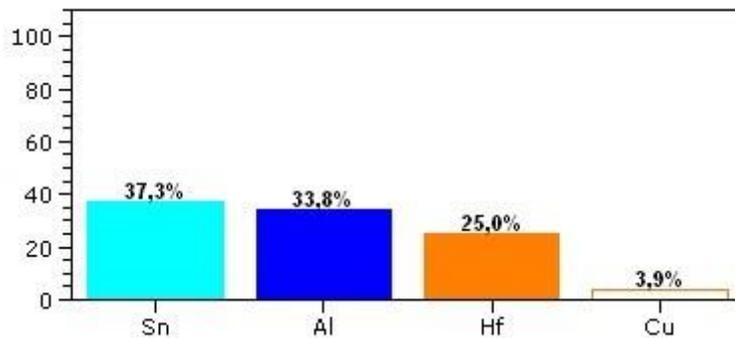


**Figura 4-7 Elementos encontrados por el EDS en la muestra de la cubierta posterior (PVF y PET) y su porcentaje de masa respectivo.**

Se puede observar en la Figura 4-7 que se encontró la presencia de carbono, oxígeno y flúor. El carbono en un 55.3% de composición de masa, siendo este el que más moléculas aporta en la fórmula química, seguido del hidrógeno, que no es identificado por el microscopio. El oxígeno (con un 35.5% de masa) aporta más moléculas que el flúor (9.2%). Se puede determinar por lo tanto que no hay presencia de metales pesados en la cubierta posterior del panel, por ende este cumple los requerimientos para ser co-procesado o reciclado.

#### *Contactos metálicos*

Se analizó una muestra de contacto metálico el día martes 16 de febrero.



**Figura 4-8 Elementos encontrados por el EDS en la muestra del contacto metálico y su porcentaje de masa respectivo.**

Como se puede observar en el gráfico anterior (Figura 4-8) el contacto está compuesto en peso por 4 elementos. Estos son estaño, aluminio, hafnio y cobre, donde el principal es estaño con un 37.3%,

seguido de aluminio con un 33.8%. Ninguno de los elementos que compone el contacto metálico es un metal pesado.

## **4.2 Matriz de Evaluación**

### **4.2.1 Evaluación de las diferentes alternativas de gestión por material**

- El aluminio del marco metálico se puede disponer en el relleno sanitario, o recuperar, ya sea por reutilización o reciclado. El aluminio no se puede valorar energéticamente, por co-procesamiento, ya que es chatarra.
- El vidrio plano de la cubierta frontal se puede disponer en el relleno sanitario, o recuperar (reutilizar, reciclar o valorar energéticamente).
- El Óxido de Polifenileno se puede disponer en el relleno sanitario, o se puede recuperar, específicamente por valoración energética. Este plástico no se puede reciclar ya que no entra en la clasificación de los tipos de plásticos que se pueden reciclar.
- La celda de silicio con trazas de Etil Vinil Acetato se puede disponer en el relleno sanitario, o recuperar, por reciclaje. Para recuperarlo habría que separar el EVA del silicio. No se puede reutilizar ya que la celda se quiebra luego del tratamiento térmico.
- El Polivinilo de Fluoruro y Tereftalato de Polietileno con trazas de Etil Vinil Acetato se pueden disponer en el relleno sanitario, o recuperar mediante valoración energética. Esta mezcla de plásticos no puede reciclarse, ya que no se cataloga como del tipo 7, ya que tanto el PVF como el EVA no se encuentran entre los tipos de plásticos del 1 al 6 que se pueden reciclar. Es importante considerar que para el caso de la valoración energética, al contener el PVF un elemento halógeno (flúor), este se tendría que disolver previo a su co-procesamiento.
- El aluminio del contacto metálico se puede disponer en el relleno sanitario, o recuperar mediante el reciclaje. No se puede co-procesar por ser chatarra.

### **4.2.2 Alternativa y lugar de gestión seleccionado por material**

Según los resultados obtenidos en el proceso de desmantelamiento, se le aplicó la matriz de evaluación a los materiales según como estos se separaron. Además, se realizó la evaluación según los resultados obtenidos en el análisis físico y químico. La selección del lugar de gestión se hizo

basándose en los contactos que tiene ya el CTTM con las empresas gestoras certificadas. Los resultados de las matrices de evaluación se pueden observar en el Apéndice 3. Matrices de Evaluación. A continuación se muestra en el Cuadro 4-4, a modo de resumen, los resultados obtenidos en las distintas matrices.

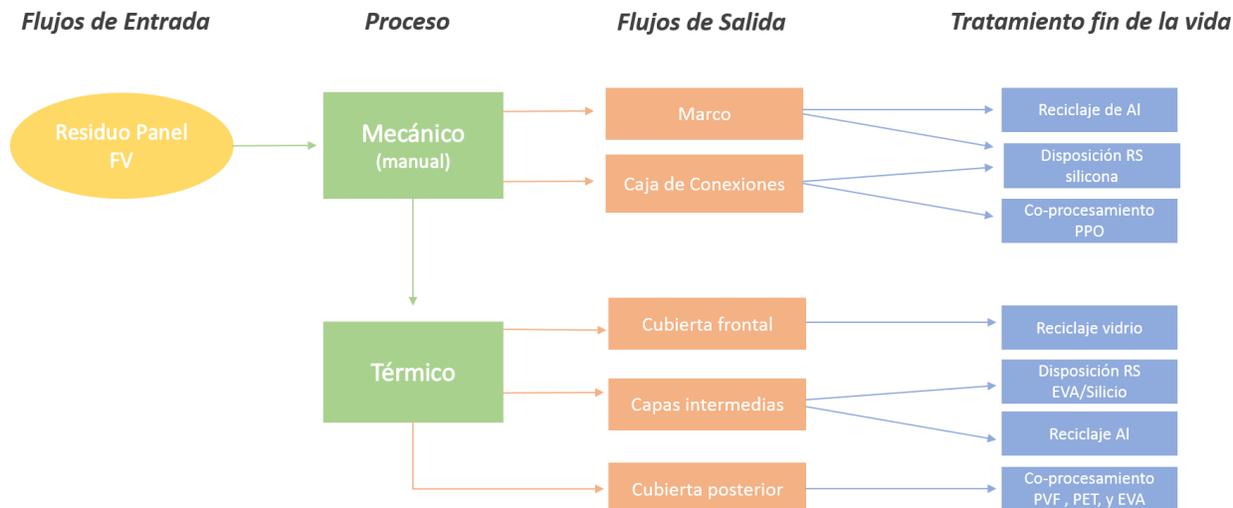
**Cuadro 4-4 Alternativa de gestión y lugar de gestión según cada tipo de material del panel fotovoltaico cristalino**

<b>Material</b>	<b>Alternativa de gestión</b>	<b>Lugar de Gestión</b>
<b>Aluminio (marco)</b>	Reciclaje	Aros Arve S.A
<b>Vidrio</b>	Reciclaje	Grupo VICAL (VICESA)
<b>PPO</b>	Valoración Energética (co-procesamiento)	Geocycle
<b>Silicio y EVA</b>	Disposición final (relleno sanitario)	Relleno Sanitario Los Pinos
<b>PVF, PET y EVA</b>	Valoración Energética (co-procesamiento)	Geocycle
<b>Contacto metálico</b>	Reciclaje	Aros Arve S.A

Basándose en los resultados obtenidos en las secciones anteriores, se determinó (según se muestra en el Cuadro 4-4) que la mejor opción disponible en Costa Rica (en términos de aprovechamiento de materia y energía) para tratar los residuos de un panel fotovoltaico es reciclar el aluminio, tanto del marco como los contactos metálicos, con la empresa Aros Arve S.A; co-procesar los plásticos (PPO, PVF, PET, EVA) con Geocycle; por último disponer en el relleno sanitario Los Pinos el silicio con las trazas de EVA. Se estaría reciclando por lo tanto alrededor de un 71.6% del panel fotovoltaico.

Para el co-procesamiento de la cubierta posterior, específicamente el componente PVF, este demostró no tener presencia de metales pesados, sin embargo al ser un material nunca antes co-procesado, la empresa Geocycle requeriría hacerle otras pruebas adicionales de laboratorio. Por no presentar metales pesados, y por ser la valoración energética la alternativa de tratamiento que se le aplica a este material, se asumió teóricamente que ese es el tratamiento de gestión que se le daría en Costa Rica.

Como complemento visual de los resultados obtenidos en las matrices de evaluación, se puede observar el diagrama de flujo del proceso de recuperación del panel fotovoltaico y los respectivos materiales que lo componen (ver Figura 4-9).



**Figura 4-9 Diagrama de flujo de la recuperación del panel fotovoltaico de silicio policristalino.**

Se estima que para alrededor de los años 2040 ya van a haber una cantidad significativa de residuos fotovoltaicos a nivel nacional; esto considerando una vida útil de 30 años. Tomando en consideración, según el ICE, que la capacidad solar fotovoltaica instalada en Costa Rica en el año 2015 es de 6455kW, y asumiendo que todos los paneles fotovoltaicos instalados son de 250 W (área aproximada de 1.6335m<sup>2</sup> y peso teórico de 19.1 kg), esto equivale a aproximadamente 10544.24m<sup>2</sup>, 25820 paneles y 493162 kg.

#### **4.2.3 Costo preliminar de gestión del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

Se calculó preliminarmente el costo, al mes de mayo del 2016, de todo el proceso de recuperación del panel fotovoltaico, asumiendo que el panel es llevado por el usuario al centro de desmantelamiento (CTTM) y sin tomar en consideración los costos por servicio de alquiler del local de desmantelamiento, agua y luz, ya que el CTTM ya asume actualmente estos costos. Es importante recalcar que se estimó que alrededor de un 71.6% del módulo se estaría reciclando con el escenario de gestión propuesto, sin embargo a diferencia de Europa, en Costa Rica no se reciben ingresos por el reciclaje del vidrio plano. Los costos finales se realizaron para un panel fotovoltaico de 250W (60 celdas, 1.6335m<sup>2</sup> y 19.1 kg) considerando un tiempo aproximado de desmantelamiento de 5 horas y 13 minutos con dos personas. En el Apéndice 4. Costos del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio cristalino en Costa Rica para el mes de mayo del 2016, se puede observar con detalle los cálculos realizados para completar el Cuadro 4-5.

**Cuadro 4-5 Costo total preliminar por gestión de un panel fotovoltaico de silicio policristalino de 250W**

	<b>Costo (¢/kg)</b>	<b>Ingresos (¢/kg)</b>
Mano de Obra	1053.11	
Transporte a Plantas de Gestión	0.68	
Recuperación (reciclaje, co-procesamiento, disposición)	17.7	67.8
Total	1071.40	67.8
Costo neto	1003.6	
Utilidad del centro de desmantelamiento (30%)		301.08
<b>Costo total (¢/kg)</b>	<b>1304.68</b>	
<b>Costo total por gestión de un panel de 250W (¢/panel)</b>	<b>24919.388</b>	

En el Cuadro 4-5 se puede observar que gestionar los residuos provenientes de un panel fotovoltaico policristalino tiene un costo de 1003.6¢/kg para el centro de desmantelamiento (CTTM). Esto debido a que el vidrio plano, el cual conforma alrededor de un 70% del peso total del panel, no es pagado en Costa Rica. Esto a diferencia de Europa en donde se paga hasta 25€/t. (HTWT, 2012) Solamente el aluminio y el cobre son pagados, pero estos representan apenas un 10.6% del peso total del módulo. Tomando en consideración que el CTTM requiere de una ganancia por la gestión de los residuos, la cual representa un 30% del costo anterior, se establece que el CTTM cobraría un total de 1304.68¢/kg panel. Por esta razón, las empresas distribuidoras de paneles deben cobrar a los consumidores en el costo final del producto aproximadamente 25000¢ para un panel de 250W, de manera que se cubran los costos de la recuperación de este. Esto demuestra que el proceso de recuperación de un panel fotovoltaico no es autogestionable, ya que no se puede cubrir por completo los costos que implica su gestión.

### **4.3 Análisis del ciclo de vida**

#### **4.3.1 Análisis del inventario**

Se realizó una recopilación y cálculo de los datos requeridos para cada proceso unitario, basándose en los límites establecidos. A continuación se muestran dichos datos para cada fase.

##### **a) Fase de extracción y fabricación**

Para la recolección de los datos de entrada de la fase de extracción y fabricación se utilizó el reporte *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems* que se muestra en el

Anexo 5. Datos para el análisis de inventario de entrada del proceso de fabricación del panel en China. En el Cuadro 4-6 se pueden observar los datos de procesos y en el Cuadro 4-7 los materiales ingresados en SimaPro.

**Cuadro 4-6 Datos de entrada de procesos requeridos para la fabricación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en China**

<b>Proceso</b>	<b>Entrada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Proceso seleccionado en SimaPro</b>
Transporte materiales en camión	5.85	tKm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6   Alloc Def, U
Transporte materiales en tren	42.5	tKm	Transport, freight train {CN}  diesel   Alloc Def, U
Electricidad	3.73	kWh	Electricity, medium voltage {CN}  electricity voltage transformation from high to medium voltage   Alloc Def, U
Diesel	0.00875	MJ	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW   Alloc Def, U
Templado	8.81	kg	Tempering, flat glass {RoW}  processing   Alloc Def, U
Trefilado	0.103	kg	Wire drawing, copper {RoW}  processing   Alloc Def, U

**Cuadro 4-7 Datos de entrada de materiales utilizados para la fabricación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en China**

Capa composición	Material	Material seleccionado en SimaPro	Masa vida útil (kg)
<b>Cubierta frontal</b>	Vidrio	Solar glass, low-iron {RoW}  production   Alloc def, U	8.81
<b>Marco</b>	Aluminio Anodizado	Aluminium alloy, AlMg3 {RoW}  production   Alloc def, U	2.13
	Silicona	Silicone product {RoW}  production   Alloc def, U	0.061
<b>Capas intermedias</b>	Silicio	Photovoltaic cell, multi-Si wafer {RoW}  production   Alloc def, U	1.496
	Estaño	Tin {RoW}  production   Alloc def, U	0.0129
	Plomo	Lead {GLO}  primary lead production from concentrate   Alloc def, U	0.000725
	Diodo	Diode, 41 auxiliaries and energy use {GLO}  production   Alloc def, U	0.00281
	Etil Vinil Acetato	Ethylvinylacetate, foil {RoW}  production   Alloc def, U	0.875
	Aluminio	Aluminium, primary, ingot {RoW}  production   Alloc def, U	0.103
	<b>Cubierta posterior</b>	Polietileno, HDPE	Polyethylene, high density, granulate {RoW}  production   Alloc def, U
	Tereftalato de Polietileno	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW}  production   Alloc def, U	0.349
	Polivinilo de Fluoruro	Polyvinylfluoride, film {RoW}  production   Alloc def, U	0.112
<b>Caja de conexiones</b>	Óxido de Polifenileno	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RoW}  production   Alloc def, U	0.295
	Silicona	Silicone product {RoW}  production   Alloc def, U	0.061
<b>Embalaje</b>	Cartón	Corrugated board box {RoW}  production   Alloc def, U	0.763
<b>Material auxiliar</b>	Propanol	1-propanol {RoW}  production   Alloc Def, U	0.0159
	Paleta Plana	EUR-flat pallet {RoW}  production   Alloc Def, U	0.05
	Fluoruro de Hidrogeno	Hydrogen fluoride {GLO}  production   Alloc Def, U	0.0624
	Isopropanol	Isopropanol {RoW}  production   Alloc Def, U	0.000147
	Hidróxido de Potasio	Potassium hydroxide {RoW}  production   Alloc Def, U	0.0514
	Agua	Water, deionised, from tap water, at user {RoW}  production   Alloc Def, U	5.03

### b) Fase de transporte

Para transportar el producto final del puerto Nanjing, China, al puerto Internacional Caldera se recorre una distancia de 15253.44 km en barco, y luego de Caldera al ITCR, una distancia en camión de 107 km. En el Cuadro 4-8 se muestran los datos del impacto por transporte, el cual fue de 231.87 tKm.

**Cuadro 4-8 Datos de procesos de transporte del panel fotovoltaico de su lugar de fabricación a Costa Rica**

Medio transporte	Impacto transporte (tKm)	Proceso seleccionado en SimaPro
Camión	1.6152	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Alloc def, U
Barco	230.2543	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6   Alloc Def, U
<b>Total</b>	<b>231.8695</b>	

### c) Fase de uso

En la fase de uso se calculó la electricidad producida por el módulo durante los 30 años de vida útil. Esta se calculó utilizando un promedio anual de radiación en Cartago de 4.527 kWh/m<sup>2</sup>/día y una eficiencia del panel de 13.6% (basándose en el reporte *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*) (Busser, Flury, Frischknecht, Jungbluth, & Stucki, 2012). La producción de electricidad por 1m<sup>2</sup> de panel durante la fase de uso sería de 6741.6084 kWh.

### d) Fase de fin de vida

#### Escenario Línea Base: sin recuperación

El escenario línea base contempla la situación actual en Costa Rica en la cual no hay una gestión de los paneles fotovoltaicos, por lo tanto este se dispondría como un todo en el relleno sanitario. La distancia recorrida para la disposición es del ITCR al Relleno Sanitario Los Pinos, donde es una distancia de 6.8km. En el Cuadro 4-9 se muestran los datos.

**Cuadro 4-9 Datos de escenarios de gestión de los residuos y sus respectivos procesos de transporte para el escenario línea base.**

Capa composición	Material	Escenario gestión Relleno Sanitario (%)	Tratamiento gestión seleccionado en SimaPro	Impacto transporte (tKm)
<b>Cubierta frontal</b>	Vidrio	100	Waste glass {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	0.0599
<b>Marco</b>	Aluminio	100	Waste aluminium {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	0.0149
	Anodizado			
	Silicona		Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Alloc Def, U	
<b>Capas intermedias</b>	Silicio	100	Waste, from silicon wafer production, inorganic {RoW}  treatment of, residual material landfill   Alloc Def, U	0.0169
	Estaño		Scrap tin sheet {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
	Plomo		Lead smelter slag {GLO}  treatment of, residual material landfill   Alloc Def, U	
	Diodo		Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
	EVA		Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
	Aluminio (Al)		Waste aluminium {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
<b>Cubierta posterior</b>	Polietileno, HDPE	100	Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	0.0033
	Tereftalato de Polietileno		Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
	Polivinilo de Fluoruro		Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	
<b>Caja de conexiones</b>	Óxido de Polifenileno	100	Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	0.0024
	Silicona		Inert waste, for final disposal {RoW}  treatment of inert waste, inert material landfill   Alloc Def, U	

### Escenario Caso Propuesto: con recuperación

Tomando en consideración los resultados obtenidos en las matrices de evaluación, se determinaron los escenarios de gestión para las capas de composición. Es importante señalar que se toma en cuenta, como tratamiento de residuo, la incineración para el caso de valoración energética, ya que este es el proceso más similar al co-procesamiento con el que cuenta el software SimaPro.

La distancia recorrida para el desmantelamiento del panel, del ITCR al CTTM, es de 5.4 km. Según el escenario de gestión se calculó la distancia del CTTM a las distintas plantas de gestión; donde la distancia del CTTM a VICESA es de 4.8 km, la distancia del CTTM a Geocycle es de 7.0 km, y la distancia del CTTM a Aros Arve es de 17.7 km.

La electricidad requerida para el proceso de desmantelamiento térmico de 1m<sup>2</sup> de panel es de 0.35905kWh. Para las pruebas térmicas se utilizó un horno pequeño (área de 0.162 m<sup>2</sup>), por lo que para determinar los datos del impacto por consumo de electricidad (kWh) para 1m<sup>2</sup> de panel se calculó la cantidad de energía que hay que suministrarle a la unidad de masa (en este caso el vidrio, EVA, silicio, y cubierta posterior) para elevar su temperatura de 25°C (temperatura ambiente asumida) a 120°C. Los cálculos se encuentran en el Apéndice 5. Cálculo del impacto por consumo de energía eléctrica (kWh) durante el proceso de desmantelamiento térmico del panel fotovoltaico. Para esta electricidad consumida por el horno se realizó un procedimiento de asignación según la matriz energética de Costa Rica para el año 2015, el cual es el último año disponible según el Centro Nacional de Control de Energía (CENSE). La asignación se muestra en el Cuadro 4-10, donde no se consideró la energía solar, ya que no existen en SimaPro datos para alto voltaje, además está es insignificante (0.01%). En la Anexo 6. Matriz energética de Costa Rica en el año 2015, Figura 9-1, se puede observar el gráfico de producción bruta de energía por fuente para este año; donde la electricidad hidroeléctrica corresponde un 75.29% y la geotérmica 12.84%.

**Cuadro 4-10 Proceso de asignación creado en SimaPro para 1 kWh de energía eléctrica según la matriz energética de Costa Rica del año 2015**

Proceso electricidad seleccionado en SimaPro	Cantidad	Unidad
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	0.7529	kWh
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, geothermal   Alloc Def, U	0.1284	kWh
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   Alloc Def, U	0.1008	kWh
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Alloc Def, U	0.0101	kWh
Electricity, high voltage {GLO}  treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal   Alloc Def, U	0.0077	kWh

En el siguiente cuadro, Cuadro 4-11, se pueden observar los datos para el caso propuesto de recuperación de los materiales.

**Cuadro 4-11 Datos de escenarios de gestión de los residuos y sus respectivos procesos de transporte para el escenario línea base.**

Capa composición	Escenario de gestión por capa composición			Tratamiento gestión seleccionado en SimaPro	Impacto transporte (tKm)	Impacto consumo (kWh)*
	Relleno Sanitario (%)	Valoración energética (%)	Reciclaje (%)			
<b>Cubierta frontal</b>	2	0	98	Waste glass {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U Packaging glass, white (waste treatment) {GLO}  recycling of packaging glass, white   Alloc Def, U	0.0909	0.1795
<b>Marco</b>	2.78	0	97.22	Aluminium (waste treatment) {GLO}  recycling of aluminium   Alloc Def, U Inert waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	0.0477	0
<b>Capas intermedias</b>	71.27	24.59	4.14	Waste, from silicon wafer production, inorganic {RoW}  treatment of, residual material landfill   Alloc Def, U Scrap tin sheet {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U Lead smelter slag {GLO}  treatment of, residual material landfill   Alloc Def, U Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U Aluminium (waste treatment) {GLO}  recycling of aluminium   Alloc Def, U	0.0299	0
<b>Cubierta posterior</b>	0	100	0	Waste polyethylene {CH}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U Waste polyethylene terephthalate {CH}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U Waste polyvinylfluoride {RoW}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U	0.0060	0.1795
<b>Caja de conexiones</b>	17.13	82.87	0	Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, municipal incineration   Alloc Def, U Inert waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Alloc Def, U	0.0032	0

\*En desmantelamiento de los materiales

### 4.3.2 Evaluación del impacto

El método elegido para la evaluación del impacto ambiental fue *midpoint* debido a que *midpoint* a diferencia de *endpoint* considera los efectos intermedios; donde las categorías de impacto ambiental intermedias son más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención. También proporcionan una información más detallada de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Se seleccionó la metodología de evaluación de impacto ReCiPe, ya que combina las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator99. La ponderación seleccionada fue H, ya que es la recomendada por el Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) para América Latina.

Con respecto a la selección de las categorías de impacto y su respectivo indicador, la selección se realizó con base en dos estudios de caso similares realizados por la Universidad de Stuttgart y Fraunhofer IBP con el Departamento de Ingeniería en Ciclo de Vida del software GaBi, a continuación se muestran dichas categorías e indicadores:

- **Cambio climático CC (kilogramo de CO<sub>2</sub> equivalente):** fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. (PRé, 2015)
- **Acidificación terrestre TA (kilogramos de SO<sub>2</sub> equivalente):** pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. (PRé, 2015)
- **Eutrofización acuática (marina ME: kilogramo equivalente de N, agua dulce FE: kilogramo equivalente de P):** crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua. (PRé, 2015)
- **Formación de oxidantes fotoquímicos, POF (kilogramo equivalente de NMVOC):** resultado de la reacción que toma lugar entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles expuestos a la radiación UV. También se conoce como smog. (PRé, 2015)

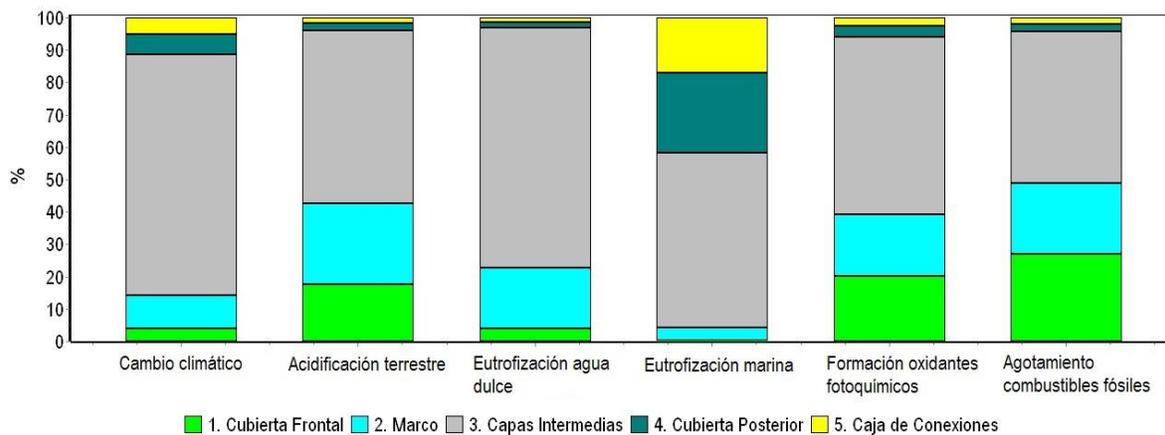
- **Agotamiento de combustibles fósiles FD (kilogramo de petróleo equivalente):** es la cantidad de combustible fósil extraído; donde 1 kg de petróleo equivalente tienen un poder calorífico inferior equivalente de 42 MJ. (PRé, 2015)

Es importante recordar que como se estableció en los alcances del ACV, la fase en la cual se enfocó el estudio es en la fase de fin de vida, ya que es la fase en la cual se genera más impacto en Costa Rica; y por lo tanto en la cual se puede influir.

La evaluación de la fase de fin de vida se realizó para todo el panel fotovoltaico de silicio policristalino (según sus capas de composición), y luego se profundizó en cada capa específica que compone el panel. Los resultados de cada capa específica se encuentran en el Apéndice 6. Resultados de la Evaluación de Impacto Ambiental en SimaPro para cada capa específica de composición de un panel fotovoltaico de silicio policristalino.

A continuación se muestran los resultados, donde se evaluaron ambos escenarios (escenario línea base y el escenario propuesto de recuperación de los materiales). En el Cuadro 4-12 se muestra una visión más clara de los resultados obtenidos.

#### 4.3.2.1 Evaluación del impacto de la fase de fin de vida sin contemplar la recuperación de los materiales: Escenario Línea Base



**Figura 4-10 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.**

Los resultados en la Figura 4-10 muestran solo valores positivos en el gráfico, lo cual indica la existencia de impactos ambientales en todas las categorías analizadas por componente del panel.

Analizando todo el módulo fotovoltaico, las capas intermedias (en primer lugar) y el marco (en segundo lugar) son los que muestran tener un mayor impacto en todas las categorías.

En el caso de las capas intermedias, se puede observar que en la categoría de cambio climático (74.2%) y la eutrofización de agua dulce (74%) es donde la capa intermedia genera el mayor impacto. Profundizando en dichas categorías (ver Figura 8-19) se observa que en el caso del cambio climático la influencia se debe principalmente a la disposición en el relleno sanitario de la celda de silicio (64.3%), seguido del encapsulante EVA (29.9%) y en menor cantidad el aluminio (4.77%). Este mismo comportamiento se observa en la categoría de eutrofización de agua dulce, donde la disposición de la celda en el relleno sanitario influye en un 88.4%, el encapsulante en un 9.49% y el aluminio en un 1.62%.

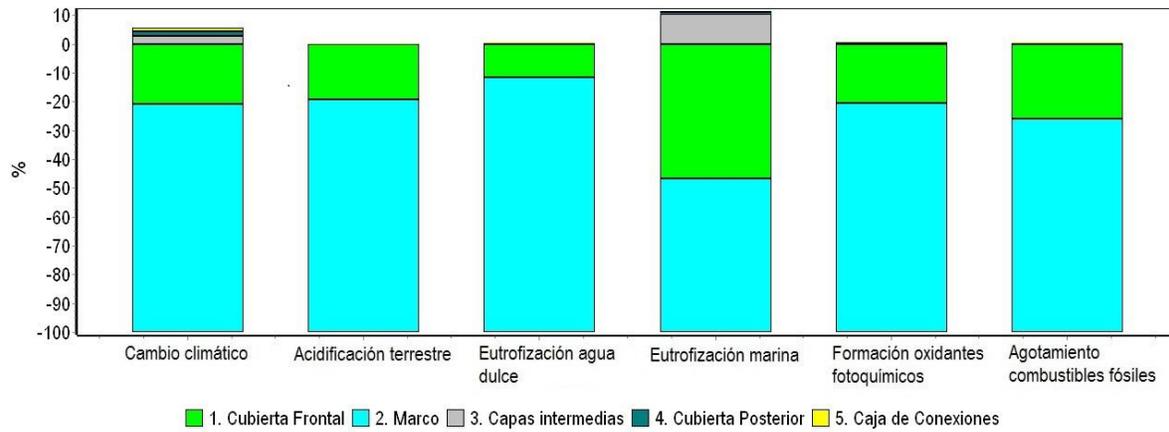
Para todas las categorías, excepto la eutrofización marina, la disposición de la celda de silicio es la que colabora en mayor cantidad en el impacto ambiental. En el caso de la eutrofización marina, es la disposición del EVA la que tiene una mayor influencia.

En las categorías de acidificación terrestre (24.9%) y agotamiento de combustibles fósiles (21.8%) es donde el marco genera el mayor impacto. Al profundizar en dichas capa (ver Figura 8-18) se puede observar que en el caso de la acidificación terrestre la influencia se debe en su gran mayoría a la disposición en el relleno sanitario del aluminio (97.1%), seguido de la silicona (1.77%). En el caso de la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, la disposición del aluminio influye en un 95.2%, y el transporte al relleno sanitario en un 3.1%.

En la Figura 8-18 se puede observar que en todas las categorías la disposición del aluminio en el relleno es el proceso que tiene una mayor influencia.

En todos los gráficos específicos de cada capa de composición (Figura 8-17, Figura 8-18, Figura 8-19, Figura 8-20 y Figura 8-21) se puede observar que el proceso de transporte de los materiales al relleno sanitario tiene un impacto insignificante a la par del impacto relacionado a la disposición de los materiales en el relleno sanitario. Esto debido a que las distancias recorridas por el camión, del TEC al Relleno Sanitario Los Pinos, son muy cortas.

### 4.3.2.2 Evaluación del impacto de la fase de fin de vida contemplando la recuperación de los materiales: Escenario Caso de Recuperación Propuesto



**Figura 4-11 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**

**Cuadro 4-12 Resultados de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de la recuperación de los materiales de un módulo de silicio policristalino (por m2)**

Recuperación de materiales módulo p-Si		CC	TA	FE	ME	POF	FD
		[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg P eq]	[kg N eq]	[kg NMVOC eq]	[kg petróleo eq]
<b>Cubierta Frontal</b>	Transporte	0.0152	3.67E-5	1.04E-6	3.98E-6	3.72E-5	5.44E-3
	Reciclaje vidrio	-11	-7.97E-2	-1.64E-3	-1.28E-2	-4.15E-2	-3.06
	Energía Eléctrica	3.56E-3	2.56E-5	7.63E-7	4.46E-6	2.68E-5	1.0E-3
	Disposición vidrio	9.58E-4	7.22E-6	9.54E-8	6.51E-7	9.99E-6	6.42E-4
	<b>Total</b>	<b>-11</b>	<b>-7.96E-2</b>	<b>-1.64E-3</b>	<b>-1.28E-2</b>	<b>-4.14E-2</b>	<b>-3.05</b>
<b>Marco</b>	Transporte	8.02E-3	1.93E-5	5.49E-7	2.1E-6	1.96E-5	2.87E-3
	Reciclaje Aluminio	-41.3	-0.332	-1.26E-2	-1.49E-2	-0.16	-8.73
	Disposición Silicona	0.0302	9.67E-6	9.4E-7	1.67E-4	2.14E-5	4.86E-4
	<b>Total</b>	<b>-41.2</b>	<b>-0.332</b>	<b>-1.26E-2</b>	<b>-1.47E-2</b>	<b>-0.16</b>	<b>-8.73</b>
<b>Capas Intermedias</b>	Transporte	5.02E-3	1.21E-5	3.44E-7	1.31E-6	1.23E-5	1.8E-3
	Disposición EVA	9.48E-2	3.47E-5	2.82E-6	1.04E-3	7.27E-5	1.93E-3
	Disposición Silicio	0.68	1.02E-3	8.76E-5	1.79E-3	1.13E-3	5.35E-2
	Reciclaje Aluminio	-8.1E-2	-6.59E-4	-2.49E-5	-2.66E-5	-3.08E-4	-1.67E-2
	Co-procesamiento EVA	0.712	2.2E-4	1.88E-5	5.35E-5	2.95E-4	5.09E-3
	Disposición otros	8.32E-3	2.64E-6	2.59E-7	4.63E-5	5.87E-6	1.32E-4
	<b>Total</b>	<b>1.42</b>	<b>6.28E-4</b>	<b>8.5E-5</b>	<b>2.99E-4</b>	<b>1.21E-3</b>	<b>4.58E-2</b>
<b>Cubierta Posterior</b>	Transporte	1.01E-3	2.43E-6	6.9E-8	2.63E-7	2.46E-6	3.6E-4
	Energía Eléctrica	4.19E-3	3.016E-5	8.97E-7	5.24E-6	3.15E-5	1.18E-3
	Co-procesamiento PVF, PET	0.832	1.65E-4	5.42E-6	4.22E-5	2.7E-4	2.01E-3
	<b>Total</b>	<b>0.837</b>	<b>1.98E-4</b>	<b>6.38E-6</b>	<b>4.77E-5</b>	<b>3.04E-4</b>	<b>3.55E-3</b>
<b>Caja de Conexiones</b>	Transporte	5.36E-4	1.29E-6	3.67E-8	1.47E-7	1.31E-6	1.92E-4
	Co-procesamiento PPO	0.6	1.42E-4	5.22E-6	3.7E-5	1.92E-4	2.91E-3
	Disposición Silicona	2.58E-2	8.92E-6	8.29E-7	1.42E-4	1.92E-5	4.68E-4
	<b>Total</b>	<b>0.627</b>	<b>1.52E-4</b>	<b>6.08E-6</b>	<b>1.8E-4</b>	<b>2.12E-4</b>	<b>3.57E-3</b>
<b>Total* (Escenario Caso Propuesto)</b>		<b>-49.3</b>	<b>-0.411</b>	<b>-1.42E-2</b>	<b>-2.44E-2</b>	<b>-0.2</b>	<b>-11.7 (- 491.4 MJ)</b>
<b>Total (Escenario Línea Base)</b>		<b>1.43</b>	<b>2.17E-3</b>	<b>1.34E-4</b>	<b>1.04E-2</b>	<b>2.6E-3</b>	<b>1.32E-1 (5.5 MJ)</b>

CC: Cambio climático; TA: Acidificación terrestre; FE: Eutrofización agua dulce; ME: Eutrofización marina; POF: Formación de oxidantes fotoquímicos; FD: Agotamientos combustibles fósiles

\*Los valores negativos describen beneficios ambientales tomados en cuenta como créditos dentro del Análisis del Ciclo de Vida (carga ambiental evitada).

En el gráfico (ver Figura 4-11) se pueden observar tanto valores positivos como negativos para las distintas categorías, pero principalmente valores negativos. Los valores negativos indican una carga ambiental evitada, y por lo tanto un beneficio ambiental. Para las seis categorías de impacto estudiadas, el marco metálico y la cubierta frontal son los que generan un mayor beneficio ambiental a la fase de fin de vida del panel. Por el contrario, en las categorías de cambio climático y eutrofización marina es donde se observa un mayor impacto ambiental.

En la categoría de cambio climático, el marco y la cubierta frontal representan un -100% de las cargas evitadas (un -21% la cubierta frontal y -79% el marco), mientras que las capas intermedias, la caja de conexiones y la cubierta posterior un 3.072% de los valores positivos.

Para la categoría de eutrofización marina, el marco y la cubierta frontal colaboran en un -100% con la carga ambiental evitada (aproximadamente -46.6% cubierta frontal y -53.4% el marco) y existe un 10.6% de impacto generado principalmente por las capas intermedias. Esto se debe a que en la producción de la celda de silicio se utilizan varios químicos (materiales auxiliares) para su limpieza y protección.

Al analizar la cubierta frontal y el marco (ver Figura 8-22 y Figura 8-25), se puede observar que el reciclaje tanto del vidrio como del aluminio reduce en gran cantidad el perfil ambiental de la fase de fin de vida del módulo. Los beneficios ambientales asociados al reciclaje del aluminio son significativamente mayores que los del reciclaje del vidrio, a pesar de que la masa del vidrio es cuatro veces mayor que la del aluminio.

En los gráficos específicos de capas intermedias, cubierta posterior y caja de conexiones (ver Figura 8-24, Figura 8-25 y Figura 8-26) se puede observar que el proceso de aprovechamiento energético de residuos plásticos contribuye al cambio climático (en  $2.14\text{kg CO}_2\text{ eq/m}^2$ ) debido a las emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas durante el proceso de co-procesamiento. Con respecto a los casos en los que hay disposición de residuos (ver Figura 8-23, Figura 8-24 y Figura 8-26), las contribuciones más significativas están relacionadas con el tratamiento de las aguas residuales en la eutrofización acuática, principalmente marina (contribuciones relacionadas con el óxido de nitrógeno y la demanda química de oxígeno).

En las etapas del proceso de desmantelamiento en las cuales se realizó un método térmico (ver Figura 8-22 y Figura 8-25), el uso de energía eléctrica no genera un impacto muy alto. Esto debido a que la cantidad de electricidad requerida es muy baja por ser  $1\text{m}^2$ , así como la matriz energética de Costa Rica es en su gran mayoría es limpia.

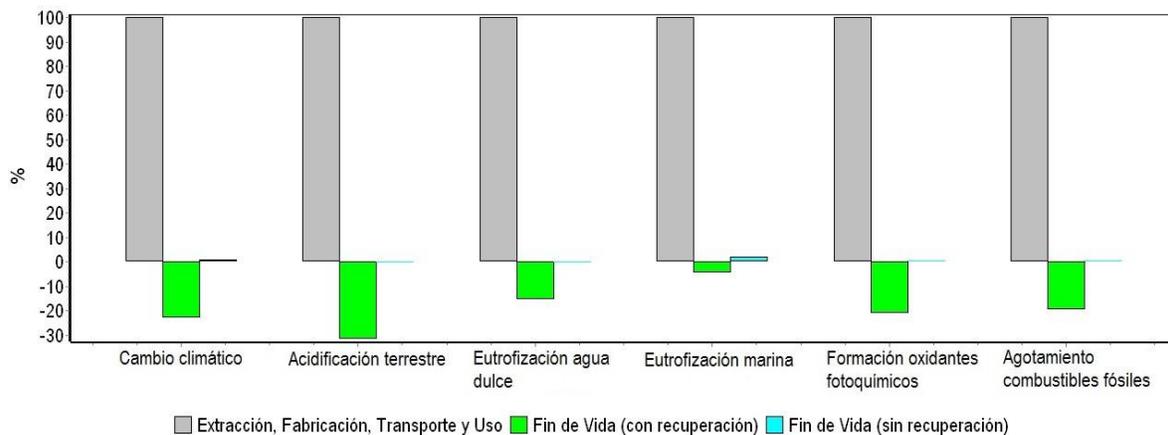
El impacto del proceso de transporte de los materiales al Centro de Desmantelamiento y Planta de Gestión es insignificante en las capas en las cuales hay cargas ambientales evitadas, como el caso del reciclaje del vidrio y el aluminio. Por otro lado, en los casos en los que si hay cargas ambientales, como es el caso del co-procesamiento de plásticos o disposición de la celda de silicio, el impacto debido al transporte es muy bajo (esto debido a que las distancias son muy cortas) y se asocia principalmente al agotamiento de combustibles fósiles por el uso de diésel.

En el Cuadro 4-12, se muestra que la recuperación de los materiales reduciría el cambio climático de 1.43kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> a -49.3kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (reducción de alrededor de -50.73kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>) y en términos de combustibles fósiles (petróleo) de 5.54MJ/m<sup>2</sup> a -491.4MJ/m<sup>2</sup> (reducción de alrededor de -496.94MJ/m<sup>2</sup>).

En términos país, donde se tienen 10544.24m<sup>2</sup> de paneles fotovoltaicos, si se recuperara toda la capacidad solar fotovoltaica, el cambio climático se reduciría en -533.85t CO<sub>2</sub> eq, y el agotamiento de petróleo en -5.24TJ.

#### 4.3.2.3 Significancia de la fase de fin de vida al ciclo de vida del producto

La Figura 4-12 presenta los resultados de la EICV del ciclo de vida de un panel fotovoltaico de silicio policristalino. Los impactos debido a las fases de extracción, fabricación, transporte y uso se establecen en 100%.



**Figura 4-12 Fases del ciclo de vida del panel fotovoltaico de silicio policristalino.**

El análisis muestra que, comparado con las fases de extracción, fabricación, transporte y uso, la contribución relativa de la fase de fin de vida del módulo de silicio policristalino ronda entre 0.147-

1.99% en las categorías de impacto ambiental consideradas. Es importante recalcar que la fase de extracción, fabricación, transporte y uso representan la gran mayoría del ciclo de vida del panel, y por ende las cargas ambientales provenientes de estas fases (principalmente la fase de extracción de materiales) tienen un alto impacto sobre este. Por esta razón, en el gráfico anterior se observa una menor contribución de la fase de fin de vida respecto a todo el ciclo de vida del panel. Sin embargo, el estudio se enfoca en la fase de fin de vida ya que es en la cual Costa Rica tiene influencia. En la Figura 8-27 del Apéndice 7. Resultados de la Evaluación de Impacto Ambiental en SimaPro para las fases de extracción de materiales, fabricación, transporte y uso, se puede observar la EICV de las fases previas al fin de vida.

Además, la Figura 4-12 muestra que debido a la recuperación de los materiales en la fase de fin de vida, los impactos ambientales del ciclo de vida del módulo de silicio policristalino podrían reducirse de un 4.67% a un 31.7% en las categorías de impacto respectivas. Siendo la categoría de eutrofización marina la que se reduciría en menor cantidad (4.67%), como se mostró anteriormente debido al impacto de las aguas residuales provenientes de la disposición de la celda de silicio en el relleno sanitario, y la acidificación terrestre en una mayor cantidad (31.7%), gracias a las cargas ambientales evitadas por los procesos de reciclaje de vidrio y aluminio. La categoría de cambio climático se reduciría en un 22.9%, y la de agotamiento de combustibles fósiles en un 19.6%.

## 5 CONCLUSIONES

- Los paneles fotovoltaicos de silicio policristalino no se están diseñando desde un enfoque de ciclo de vida (diseño sostenible del producto), y por lo tanto no se está contemplando su posterior reciclaje. Esto debido a que por la manera en la cual se están ensamblando los módulos por las empresas fabricantes (principalmente por el uso del EVA como encapsulante) se dificulta el proceso de desmantelamiento.
- La alternativa de gestión más adecuada en Costa Rica para el tratamiento de los materiales que componen un panel fotovoltaico de silicio policristalino es el reciclaje del marco de aluminio y la cubierta de vidrio, la valoración energética por co-procesamiento de la caja de conexiones (PPO), la disposición en el relleno sanitario de la celda de silicio con restos de EVA, el co-procesamiento de la cubierta posterior (PVF, PET) con restos de EVA, y el reciclaje de los contactos metálicos de aluminio.
- Mediante el proceso de recuperación propuesto se estaría reciclando un 71.6% del panel fotovoltaico, sin embargo este proceso no es autogestionable y tiene un costo total preliminar de 1305\$/kg.
- El desempeño ambiental de la etapa de fin de vida del panel fotovoltaico de silicio policristalino (cuando este se recupera) es atípico, en comparación a otros estudios de caso, debido a que las mayores cargas ambientales no son debido al proceso de transporte ni de uso de energía eléctrica, dado que en Costa Rica las distancias recorridas para recuperar los materiales son muy cortas y la matriz energética es un 98.99% renovable.
- Los principales impactos ambientales del escenario línea base en la etapa de fin de vida son debido la disposición de la celda de silicio y el marco de aluminio en el relleno sanitario.
- Para la fase de fin de vida del panel fotovoltaico de silicio policristalino en la que se contempló la recuperación de este, la mayor carga ambiental es debido al co-procesamiento de los residuos plásticos (EVA, PET, PVF y PPO) y la disposición de los residuos en el relleno sanitario (principalmente la celda de silicio). Los principales beneficios ambientales son debido al reciclaje del vidrio y el aluminio.

- La recuperación de los materiales de un panel fotovoltaico de silicio policristalino reduciría el impacto potencial en el cambio climático en aproximadamente  $-50.73\text{kg CO}_2\text{ eq/m}^2$  y el agotamiento de combustibles fósiles en aproximadamente  $-496.94\text{MJ/m}^2$ .
- Si se recupera toda la capacidad solar fotovoltaica instalada en Costa Rica, el impacto en cambio climático se reduciría en  $-534.91\text{t CO}_2\text{ eq}$ , y el agotamiento de petróleo en  $-5.24\text{TJ}$ .
- La recuperación de los materiales del panel fotovoltaico de silicio policristalino contribuye a la reducción del perfil ambiental del ciclo de vida de este de un  $4.67\%$  a un  $31.7\%$ , dependiendo de la categoría ambiental.

## 6 RECOMENDACIONES

- Se le recomienda a las empresas fabricantes de paneles fotovoltaicos utilizar otro tipo de selladores para el marco de aluminio, de manera que sea más fácil su desmantelamiento (los centros de investigación de PV Cycle recomiendan *O-ring*, *U-profile*, *Sponge rubber*, o *Single sided adhesive tape*). También utilizar una cubierta posterior que no contenga flúor para que no haya emisiones en los tratamientos térmicos. Por último, sustituir el encapsulante EVA por termoplásticos que sean más fáciles de fundir.
- Las empresas distribuidoras de paneles en Costa Rica deben de contemplar en el precio final del producto el costo de recuperación del panel una vez que este alcance su vida útil. Para este proyecto se determinó que el costo preliminar para un panel de 250W es de aproximadamente 25000¢.
- En el procedimiento de desmantelamiento del panel se recomienda posterior al método térmico, utilizar un plato de succión para que sea más fácil manipular este y por ende la separación de la capa posterior (PVF y PET). También es preferible utilizar un horno de cámara al vacío como lo han realizado los centros de investigación de PV Cycle, y que la forma y volumen de este sean de las mismas dimensiones del panel, de manera que no se desperdicie energía en el calentamiento del aire presente en el volumen del horno que no está siendo utilizado. Para facilitar el proceso de separación tanto del vidrio como de la cubierta posterior; luego del horno, se recomienda buscar una manera para mantener el calor en la muestra, y que no haya pérdidas de calor durante la separación de las capa; por ejemplo que la superficie del plato de succión se encuentre caliente.
- El panel utilizado como muestra traía el vidrio quebrado, y por ende todas las pruebas se realizaron con el vidrio ya triturado. Por esto se recomienda aplicarle el proceso de desmantelamiento y recuperación a un panel que no tenga el vidrio quebrado para ver si este variaría.
- Como resultado de la matriz de evaluación de la cubierta posterior, se determinó teóricamente que esta se iba a co-procesar, por lo que se recomienda realizar con Geocycle las pruebas de laboratorio necesarias para determinar si efectivamente el PVF cumple los requerimientos para ser co-procesado.

- Se debe de buscar otra alternativa de gestión para la celda de silicio, ya que su disposición en el relleno sanitario tiene un alto impacto (principalmente en la categoría de eutrofización marina). Por esto se recomienda profundizar en la investigación del uso del silicio en la mezcla de cemento.
- Se recomienda realizar nuevamente los costos del proceso de recuperación cuando exista una cantidad importante de residuos de paneles fotovoltaicos en el país, esto considerando una empresa gestora certificada para tal fin.
- Para una futura evaluación o estudio similar en el cual se utilice el mismo software se recomienda crear un nuevo proceso de tratamiento de residuos con los datos específicos (inventario) de entradas y salidas del co-procesamiento y no utilizar el proceso ya existente de incineración. De manera que se puedan obtener datos más reales del impacto ambiental. Además, se recomienda medir el consumo real (kWh) del horno cuando se caliente el panel a 120°C.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Bekkelund, K. (2013). *A comparative life cycle assessment of PV solar systems*

Bennett, I., Clyncke, J., Geerligs, B., Goris, M., & Olson, C. (2013). Current and future priorities for mass and material in silicon PV module recycling. *6BV 8.2 (EUPVSEC)*

Blanco, F. *Lección 9. Vidrio/Tipos de vidrios*. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion9.VIDRIO.TiposVidrio.pdf>

Boyle, G. (2012). *Environmental impact and safety of PV production. Renewable energy power for a sustainable future* (pp. 107). United Kingdom: Oxford University Press.

Bridson, J. (1999). Other thermoplastics containing p-phenylene groups. *Plastics materials* (7th ed., pp. 584) Butterworth-Heinemann.

Bridson, J. (1999). Polyesters. *Plastics materials* (7th ed., pp. 694) Butterworth-Heinemann.

Busser, S., Flury, K., Frischknecht, R., Jungbluth, N., & Stucki, M. (2012). *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*. (174-LCI-Photovoltaics-2012\_v1.1). Swiss Federal Office of Energy.

Castejón, A., & Santamaría, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas* Editek.

Castro, R. Ley para la gestión integral de residuos no. 8839 del 13 de julio de 2010 (anotada, concordada y comentada), (2012).

Centro Nacional de Producción más Limpia. (2009). Hornos y calderas (FIRED HEATERS). *Diseño de equipos e instalaciones*

Dubey, S., Jadhav, N., & Zakirova, B. (2012). *Socio-economic and environmental impacts of silicon based photovoltaic (PV) technologies*.

DuPont. (2015). Interactive: *What makes up a solar panel?* Recuperado de <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/what-makes-up-solar-panel.html>

Ebnesajjad, S. (2012). *Polyvinyl fluoride: Technology and applications of PVF*. Elsevier.

Fraunhofer., & Department Life Cycle Engineering. (2012). Life cycle assessment (LCA) screening of the malta recycling process for si-PV modules [Abstract].

Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Stucki, M. (2015). *Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems*. (No. T12-04:2015). International Energy Agency.

Fthenakis, V. (2015). *PV recycling in the United States*. Recuperado de [https://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5\\_parallelevents/PV-lifecycle/14\\_Vasilis\\_FTHENAKIS.pdf](https://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5_parallelevents/PV-lifecycle/14_Vasilis_FTHENAKIS.pdf)

Fthenakis, V., Kim, H., Frischknecht, R., Raugei, M., Sinha, P., & Stucki, M. (2011). *Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems*. (No. IEA-PVPS T12-02:2011). New York, USA: International Energy Agency.

Geerligs, B. (2015). Cu-PV project. Bruselas, Bélgica.

Goldsmidt, V., Kim, M., Marcos, K., & Pampeña, R. *Ciclo de vida del vidrio de los paneles fotovoltaicos*. 24

Goris, M. (2014). Recycling friendly design the CU-PV project for sustainable photovoltaics. Amsterdam.

Hegedus, S., & Luque, A. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. United Kingdom: John Wiley & Sons.

Held, M. (2013). LCA screening of recycling process for silicon based PV modules. Roma, Italia.

Held, M. (s.f). Life cycle assessment of CdTe module recycling.

Hestin, M., & Monier, V. (2011). *Study on photovoltaic panels supplement the impact assessment for a recast of the WEEE directive*. (No. ENV.G.4/FRA/2007/0067). Paris, Francia:

Hreglich, S. (2015). *Caratterizzazione e variabilità dei pannelli fotovoltaici fine vita*. Curino.

HTWT. (2012). *Situación de la Gestión de Paneles Fotovoltaicos*. (D2.2/3)

Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science. *The status of PV recycling technologies in China*. Recuperado de [http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5\\_parallelevents/PV-life-cycle/13\\_Andreas\\_WADE.pdf](http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5_parallelevents/PV-life-cycle/13_Andreas_WADE.pdf)

Instituto Costarricense de Electricidad. (2015). *Generación y demanda informe anual*.

Ito, M. (2011). *Life cycle assessment of PV system*. In Sukumar Basu (Ed.), *Crystalline silicon - properties and uses* (pp. 297) Tokyo Institute of Technology. doi:10.5772/23134

Komoto, K. (2014). *Developments on PV recycling in japan*. Recuperado de [http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5\\_parallelevents/PV-life-cycle/12\\_Keiichi\\_KOMOTO.pdf](http://www.photovoltaic-conference.com/images/stories/29th/5_parallelevents/PV-life-cycle/12_Keiichi_KOMOTO.pdf)

Krueger, L. *Overview of first solar's module collection and recycling program*. Recuperado de [https://www.bnl.gov/pv/files/PRS\\_Agenda/2\\_Krueger\\_IEEE-Presentation-Final.pdf](https://www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/2_Krueger_IEEE-Presentation-Final.pdf)

Lehto, A., Lindroos, V., Motooka, T., & illi, M. (2010). *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. United Kingdom: Elsevier Inc.

Leiva, J., & Torres, J. (2007). *Caracterización y reciclado por extrusión del EVA de desecho ETIL VINIL ACETATO*

Lobo, K. (2015). *Energía solar en Costa Rica*. Recuperado de [https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/32d3c6a8-789a-4d56-8416-f7993aa10805/Energia+Solar+en+Costa+Rica+Kenneth+Lobo\\_2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=11epDfP](https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/32d3c6a8-789a-4d56-8416-f7993aa10805/Energia+Solar+en+Costa+Rica+Kenneth+Lobo_2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=11epDfP)

Lodovico, R. (2013). FRELIP project. Roma, Italia.

Mackenzie, S., & Totten, G. (2003). *Handbook of aluminum: Volume 2 alloy production and materials manufacturing*. New York: Marcel Dekker Inc.

Muller, A., Konrad, B., Schlenker, S., & Wambach, K. (s.f). *A Voluntary Take Back Scheme and Industrial Recycling of Photovoltaic Modules*. Solar World.

Reglamento general para la declaratoria de residuos de manejo especial, Decreto Ejecutivo 38272U.S.C. (2014).

Reglamento generación distribuida para autoconsumo con fuentes renovables modelo de contratación medición neta sencilla, Reglamento N° 39220U.S.C. (2015).

PRé. (2015). *SimaPro database manual methods library*. Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>

PV Cycle. (2013). *La ventaja PV cycle*. Recuperado de [http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2013/05/PV\\_CYCLE\\_FOLDER\\_Advantage\\_es\\_2014\\_web.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/2013/05/PV_CYCLE_FOLDER_Advantage_es_2014_web.pdf)

RenewSys. (2014). *Product data sheet*. Recuperado de <http://www.ensolar.com/ApolloF/solar/Product/pdf/EVA/538546beadc85.pdf>

Secretaria de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y el Caribe. (2000). *Alternativas de gestión de residuos sólidos industriales de la ciudad de Montevideo*

Solar Waste. *PV waste & legislation*. Recuperado de <http://www.solarwaste.eu/pv-waste-legislation/>

TDA Anodizado S.A. *Aplicaciones del anodizado*. Recuperado de <http://www.tdaanodizado.com.ar/anodizado.pdf>

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. (s.f). YGE 60 cell 40mm SERIES.

## **8 APÉNDICES**

**Apéndice 1. Imágenes del proceso de desmantelamiento del panel fotovoltaico de silicio policristalino**



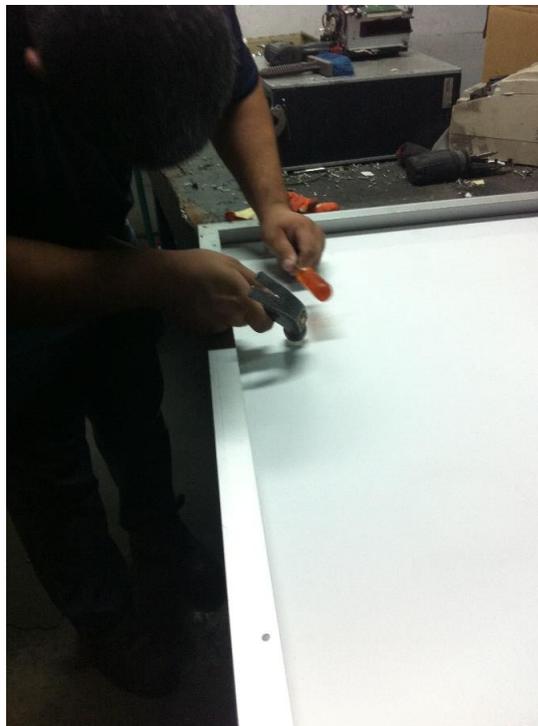
**Figura 8-1 Muestra del panel fotovoltaico de silicio policristalino.**



**Figura 8-2 Proceso de desmantelamiento de la caja de conexiones del módulo fotovoltaico.**



**Figura 8-3 Medición del peso de la caja de conexiones en balanza del CIVCO.**



**Figura 8-4 Proceso de desmantelamiento del marco metálico del módulo fotovoltaico.**



**Figura 8-5** Medición del peso del marco de aluminio en balanza del CTTM.



**Figura 8-6** Horno eléctrico utilizado para desmantelamiento del vidrio y la cubierta posterior del panel fotovoltaico.



**Figura 8-7** Proceso de desmantelamiento del vidrio del módulo fotovoltaico.



**Figura 8-8** Vidrio separado del módulo fotovoltaico.

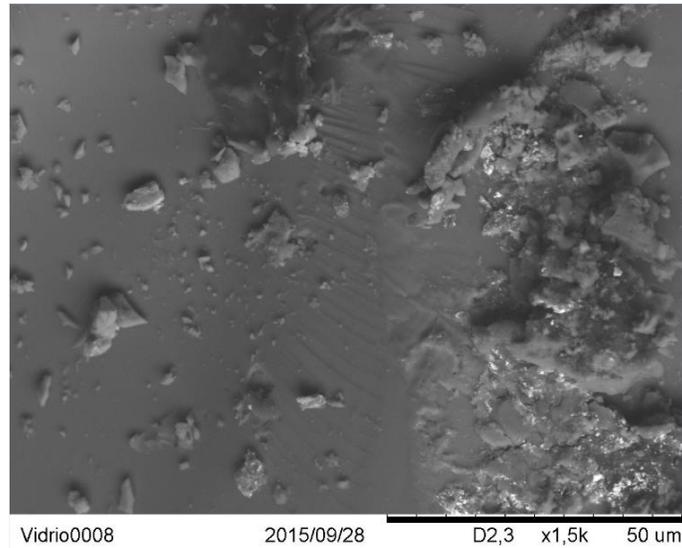


**Figura 8-9** Proceso de desmantelamiento de la cubierta posterior del módulo fotovoltaico.

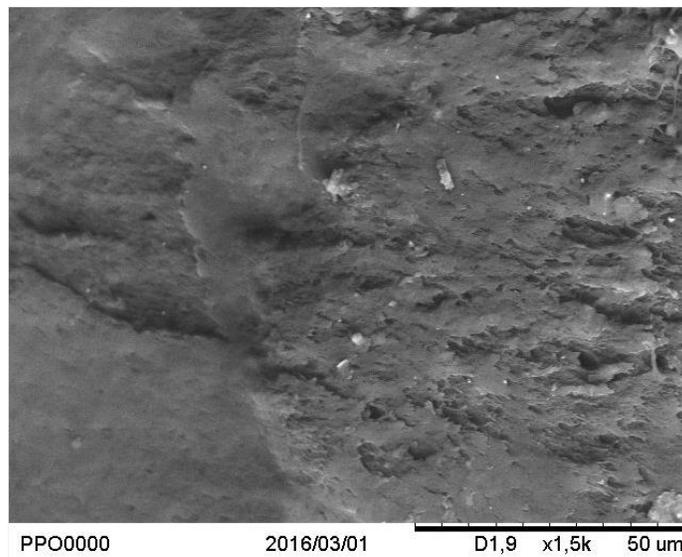


**Figura 8-10** Contacto metálico separado del módulo fotovoltaico.

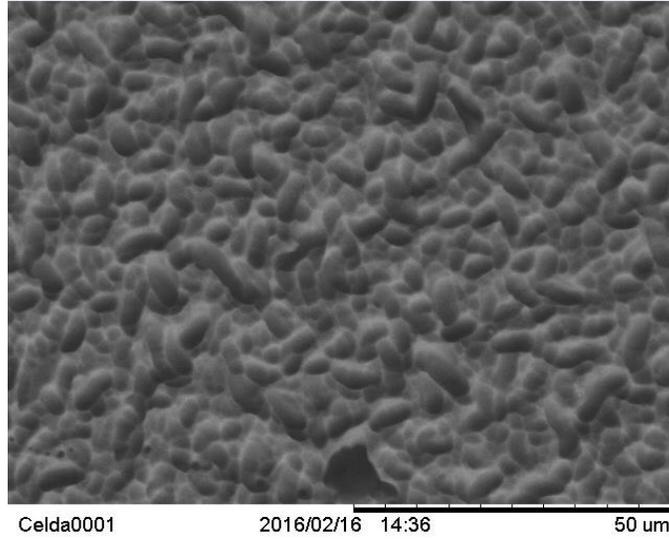
**Apéndice 2. Imágenes del análisis químico realizado a los materiales en el microscopio  
Tabletop**



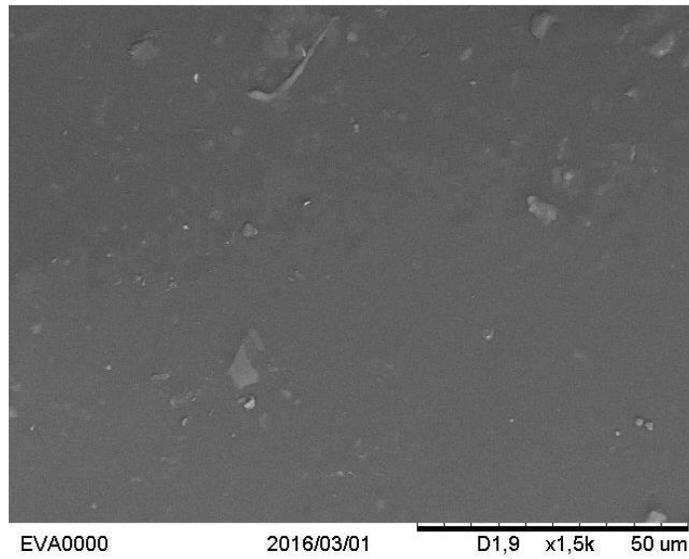
**Figura 8-11 Muestra del vidrio vista desde el microscopio a una resolución de 50  $\mu\text{m}$ .**



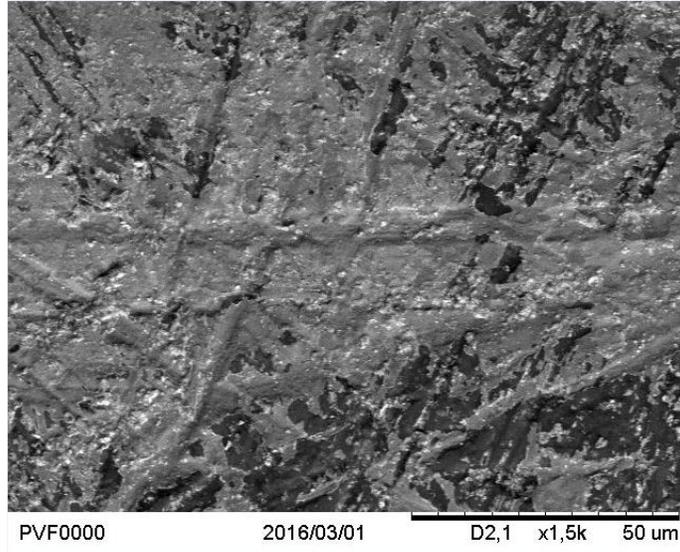
**Figura 8-12 Muestra de la caja de conexiones (PPO) vista desde el microscopio a una resolución de 50  $\mu\text{m}$ .**



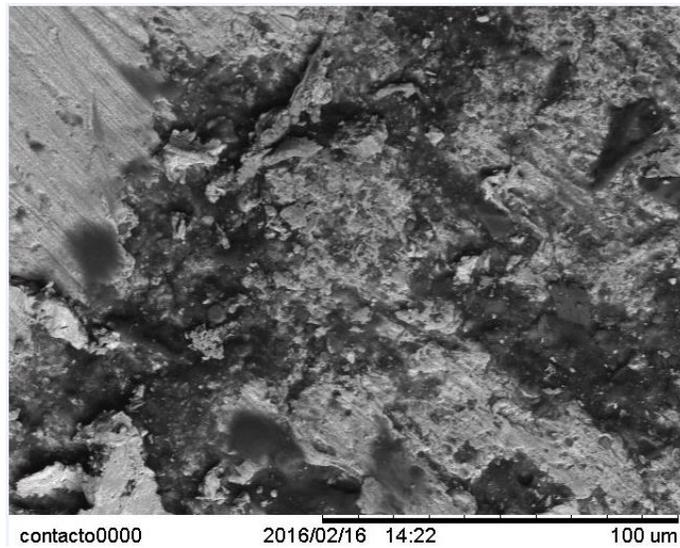
**Figura 8-13** Muestra de la celda vista desde el microscopio a una resolución de 50 μm.



**Figura 8-14** Muestra del encapsulante EVA vista desde el microscopio a una resolución de 50 μm.



**Figura 8-15** Muestra de la cubierta posterior (PVF y PET) vista desde el microscopio a una resolución de 50  $\mu\text{m}$ .



**Figura 8-16** Muestra del contacto metálico vista desde el microscopio a una resolución de 50  $\mu\text{m}$ .

### Apéndice 3. Matrices de Evaluación

**Cuadro 8-1 Matriz de evaluación para el marco de aluminio del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

Alternativa de Gestión	Circuito de Materiales	Aplicabilidad	Impacto Ambiental	Total	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	3	5	1	9
<b>Recuperación</b>	<i>Reutilización</i>	4	3	5	12
	<i>Reciclado</i>	55	5	4	<b>14</b>

**Cuadro 8-2 Matriz de evaluación para el vidrio templado de la cubierta frontal del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

Alternativa de Gestión	Circuito de Materiales	Aplicabilidad	Impacto Ambiental	Total	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	5	5	1	11
<b>Recuperación</b>	<i>Reutilización</i>	1	2	5	8
	<i>Reciclado</i>	5	5	4	<b>14</b>
	<i>Valoración Energética</i>	5	5	3	13

**Cuadro 8-3 Matriz de evaluación para el Óxido de Polifenileno de la caja de conexiones del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Alternativa de Gestión</b>	<b>Circuito de Materiales</b>	<b>Aplicabilidad</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Total</b>	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	4	5	1	10
<b>Recuperación</b>	<i>Valoración Energética</i>	5	5	3	<b>13</b>

**Cuadro 8-4 Matriz de evaluación para la celda de silicio, y la lámina de Etil Vinil Acetato del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Alternativa de Gestión</b>	<b>Circuito de Materiales</b>	<b>Aplicabilidad</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Total</b>	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	5	5	1	<b>11</b>
<b>Recuperación</b>	<i>Reutilización</i>	1	4	5	9
	<i>Reciclado</i>	2	4	4	10

**Cuadro 8-5 Matriz de evaluación para el Polivinilo de Fluoruro y el Tereftalato de Polietileno y la lámina de Etil Vinil Acetato del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Alternativa de Gestión</b>	<b>Circuito de Materiales</b>	<b>Aplicabilidad</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Total</b>	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	5	5	1	11
<b>Recuperación</b>	<i>Valoración Energética</i>	5	5	3	<b>13</b>

**Cuadro 8-6 Matriz de evaluación para los contactos metálicos del panel fotovoltaico de silicio policristalino**

<b>Alternativa de Gestión</b>	<b>Circuito de Materiales</b>	<b>Aplicabilidad</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Total</b>	
<b>Disposición final</b>	<i>Relleno Sanitario</i>	5	5	1	11
<b>Recuperación</b>	<i>Reciclaje</i>	5	5	3	<b>13</b>

**Apéndice 4. Costos del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio cristalino en Costa Rica para el mes de mayo del 2016**

- a) Costo de mano de obra para un salario de MERMA de 430000.00¢ por trabajador

$$\frac{430000\text{¢}}{\text{mes}} \cdot \frac{1 \text{ mes}}{20 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{9 \text{ h}} = \frac{2388.89\text{¢}}{\text{h}}$$

Tomando en consideración 2 trabajadores; donde uno trabaja 5.72h y el otro 2.7h

- Trabajador 1:

$$5.72\text{h} \cdot \frac{2388.89\text{¢}}{\text{h}} = 13664.45\text{¢}$$

- Trabajador 2:

$$2.7\text{h} \cdot \frac{2388.89\text{¢}}{\text{h}} = 6450.00\text{¢}$$

- Total mano de obra:

$$13664.45\text{¢} + 6450.00\text{¢} = \frac{20114.45\text{¢}}{19.1\text{kg}} = \frac{\mathbf{1053.11\text{¢}}}{\mathbf{kg}}$$

- b) Costo del transporte a las distintas plantas de gestión para un camión de 16t

- VICESA:

$$\frac{300\text{¢}}{\text{km}} \cdot 4.8\text{km} = 1440\text{¢}$$

- Geocycle:

$$\frac{300\text{¢}}{\text{km}} \cdot 7.0\text{km} = 2100\text{¢}$$

- Aros Arve:

$$\frac{300\text{¢}}{\text{km}} \cdot 17.7\text{km} = 5310\text{¢}$$

- Relleno Sanitario Los Pinos:

$$\frac{300\text{¢}}{\text{km}} \cdot 6.8\text{km} = 2040\text{¢}$$

- Total transporte:

$$1440\text{¢} + 2100\text{¢} + 5310\text{¢} + 2040\text{¢} = \frac{10890\text{¢}}{16t} \cdot \frac{1t}{1000kg} = \frac{\mathbf{0.68\text{¢}}}{kg}$$

c) Costo de recuperación

- VICESA: el vidrio plano no tiene valor comercial.
- Geocycle: al tener el plástico un poder calorífico alto, el CTTM tiene un acuerdo con Geocycle, y por lo tanto el co-procesamiento de este no tiene costo. Por esta razón se asume que se negociaría.
- Relleno Sanitario Los Pinos:

$$\frac{17\text{¢}}{kg}$$

- Costo total de recuperación:

$$\frac{\mathbf{17\text{¢}}}{kg}$$

d) Ganancia por recuperación

- Aros Arve: asumiendo un 10% aluminio y un 0.6% de cobre por panel
  - 0.1 kg Al en 1 kg panel fotovoltaico cristalino
  - 0.006 kg Cu en 1 kg panel fotovoltaico cristalino

$$\frac{600\text{¢}}{kg Al} \cdot 0.1kg Al = 60\text{¢}$$

$$\frac{1300\text{¢}}{kg Cu} \cdot 0.006kg Cu = 7.8\text{¢}$$

- Ganancia total:

$$\frac{60\text{¢}}{kg} + \frac{7.8\text{¢}}{kg} = \frac{\mathbf{67.8\text{¢}}}{kg}$$

## Apéndice 5. Cálculo del impacto por consumo de energía eléctrica (kWh) durante el proceso de desmantelamiento térmico del panel fotovoltaico

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

### Datos para el vidrio

- Masa en 1 m<sup>2</sup>: 8810g (tomado del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)
- T<sub>i</sub>: 25°C
- T<sub>f</sub>: 120°C
- ΔT: 95°C=95K
- C: 0.84 J/gK (tomado del Cuadro 9-1)
- 1Wh= 3600J

$$\frac{0.84 J}{gK} \cdot 8810g \cdot 95k = 703038J$$

$$703038 J \cdot \frac{1Wh}{3600 J} = 195.28Wh$$

### Datos para el EVA

- Masa en 1 m<sup>2</sup>: 875g (tomado del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)
- T<sub>i</sub>: 25°C
- T<sub>f</sub>: 120°C
- ΔT: 95°C=95K
- C: 2.8 J/gK (tomado del Cuadro 9-3)
- 1Wh= 3600J

$$\frac{2.8 J}{gK} \cdot 875g \cdot 95 = 232750J$$

$$232750 J \cdot \frac{1Wh}{3600 J} = 64.65Wh$$

### Datos para el silicio

- Masa en 1 m<sup>2</sup>: 1496g (tomado del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)
- T<sub>i</sub>: 25°C
- T<sub>f</sub>: 120°C
- ΔT: 95°C=95K
- C: 0.705 J/gK (tomado del Cuadro 9-6)
- 1Wh= 3600J

$$\frac{0.705J}{gK} \cdot 1496g \cdot 95 = 100194.6J$$

$$10019.46 J \cdot \frac{1Wh}{3600 J} = 27.83Wh$$

### Datos para cubierta posterior

- Masa en 1 m<sup>2</sup>: 484.8g (tomado del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)
- T<sub>i</sub>: 25°C
- T<sub>f</sub>: 120°C
- ΔT: 95°C=95K
- C: 1 J/gK (tomado del Cuadro 9-5) Se toma el PET, ya que es el que compone la cubierta posterior en mayor proporción
- 1Wh= 3600J

$$\frac{1J}{gK} \cdot 484.8g \cdot 95 = 46056J$$

$$10019.46 J \cdot \frac{1Wh}{3600 J} = 12.79Wh$$

### Valor teórico de la energía requerida para llevar la muestra de 1 m<sup>2</sup> a una temperatura de 120°C

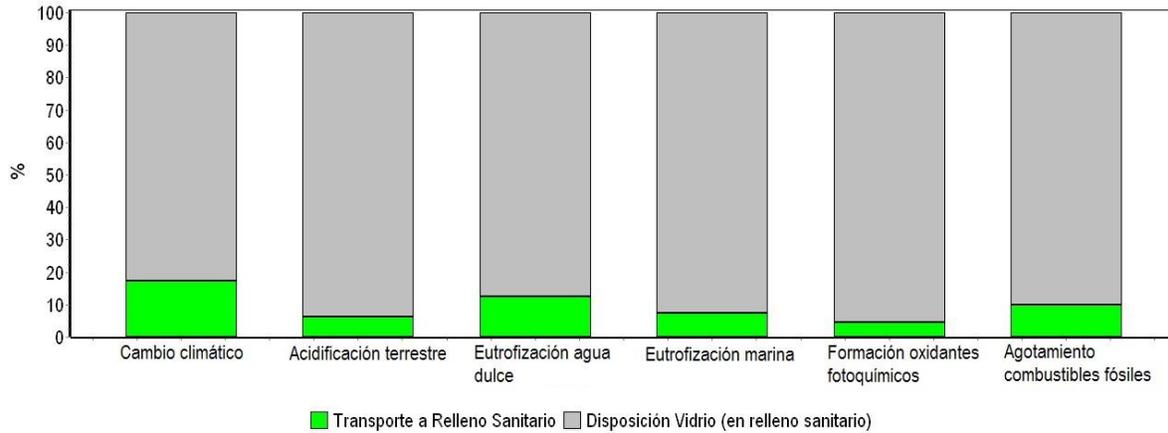
$$195.28Wh + 64.65Wh + 27.83Wh + 12.79Wh = 305.55Wh$$

Se asume una eficiencia del horno de un 82.5% (teoría establece de 70-95% de eficiencia) (Centro nacional de Producción más Limpia, 2009).

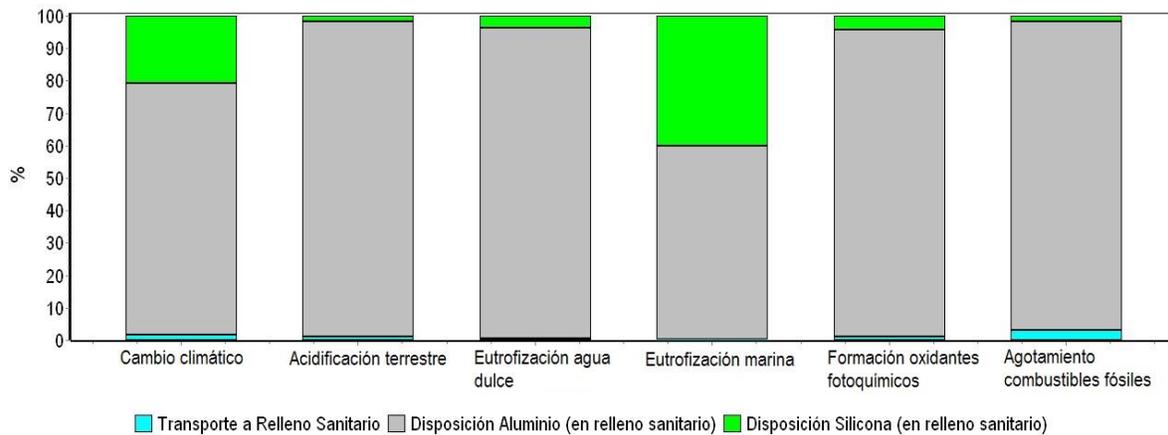
$$305.55Wh + (305.55Wh \cdot 0.175) = \mathbf{359.05Wh}$$

## Apéndice 6. Resultados de la Evaluación de Impacto Ambiental en SimaPro para cada capa específica de composición de un panel fotovoltaico de silicio policristalino

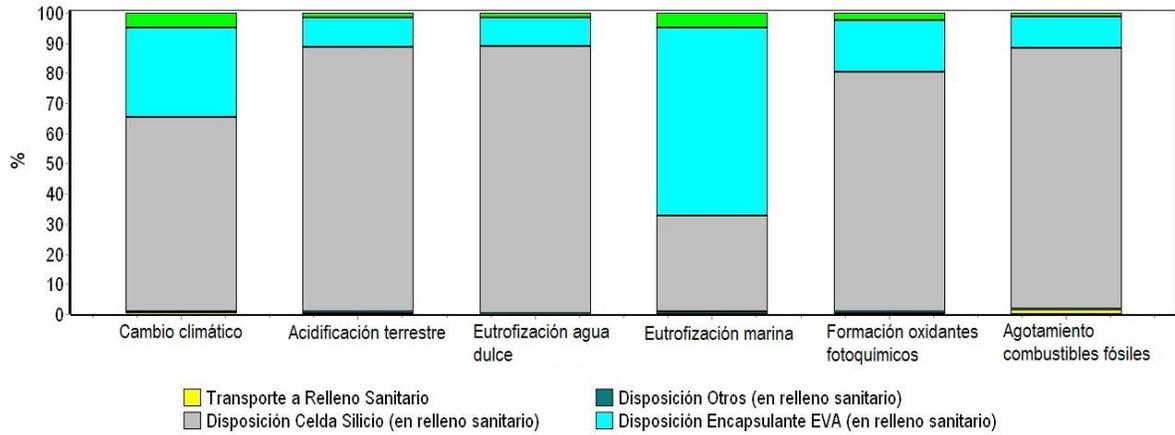
### 8.1.1 Escenario Línea Base



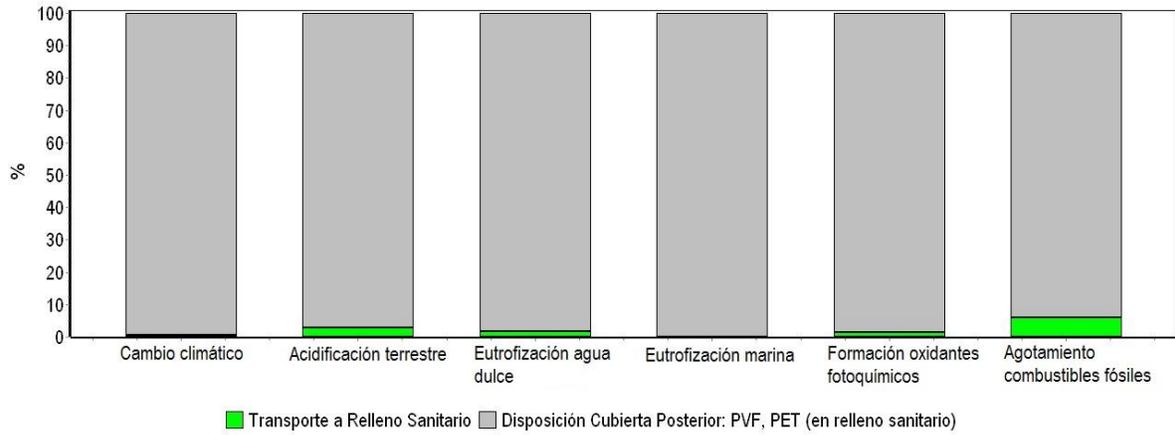
**Figura 8-17** Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de cubierta frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.



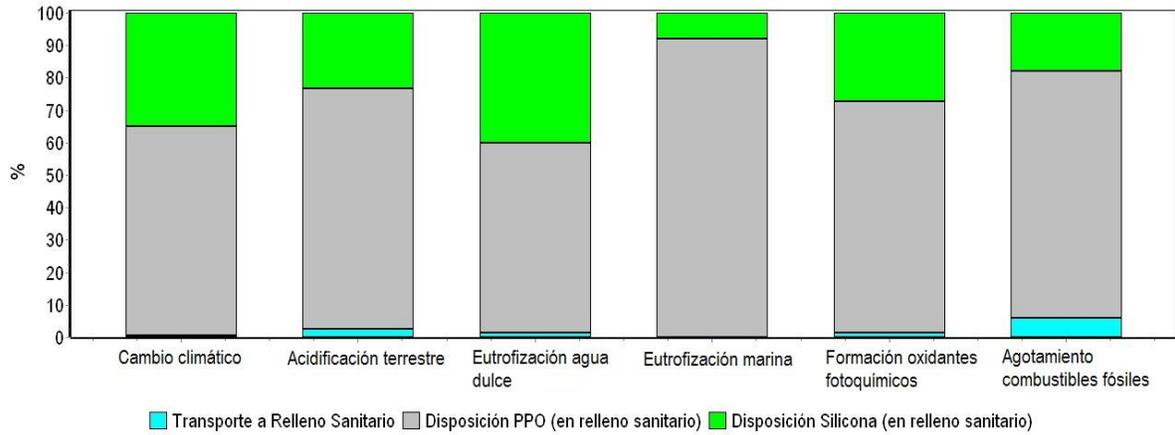
**Figura 8-18** Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida del marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.



**Figura 8-19 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de las capas intermedias de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.**

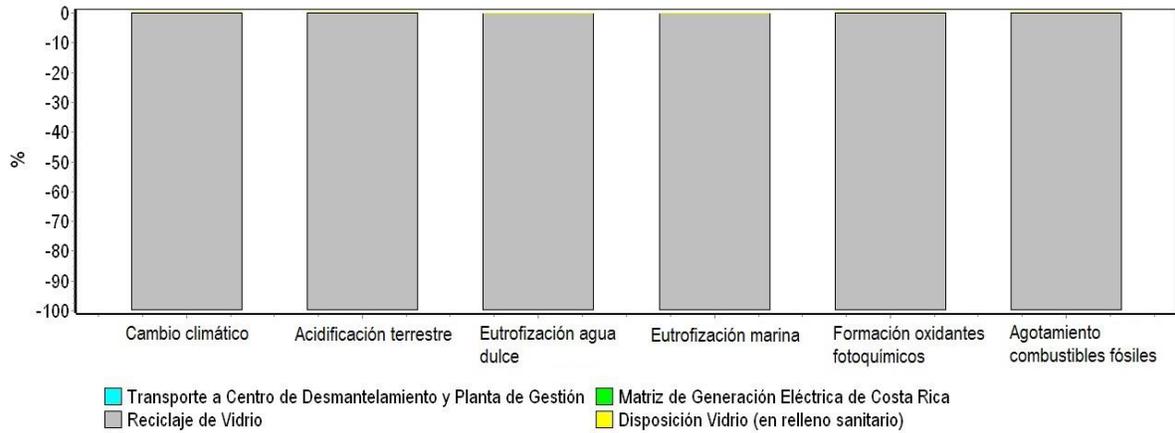


**Figura 8-20 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta posterior de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.**

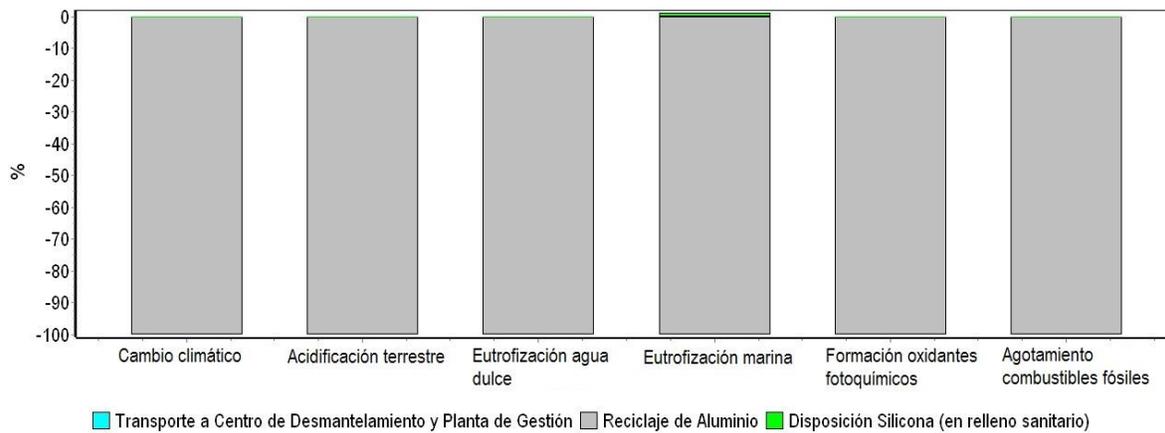


**Figura 8-21 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la caja de conexiones de un panel fotovoltaico de silicio policristalino sin la recuperación de los materiales.**

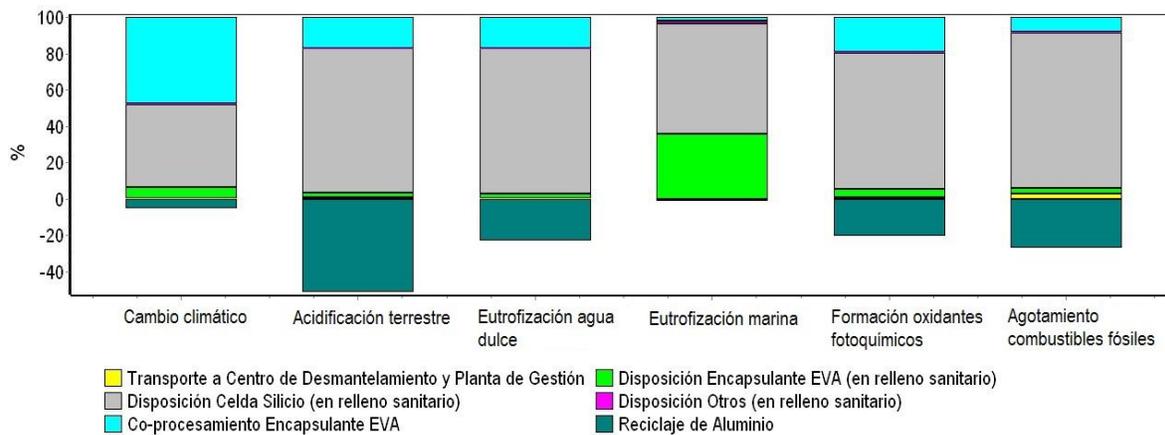
### 8.1.2 Escenario de Recuperación



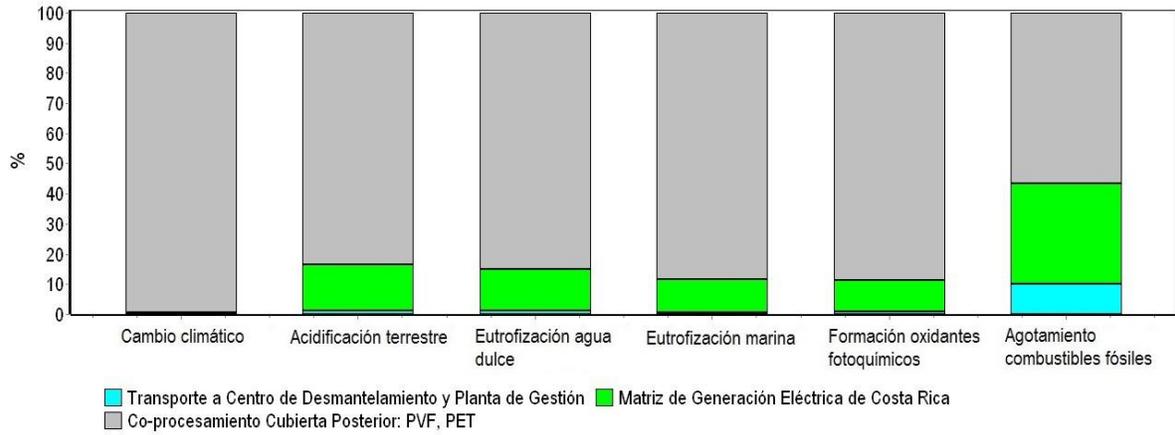
**Figura 8-22 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta frontal de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**



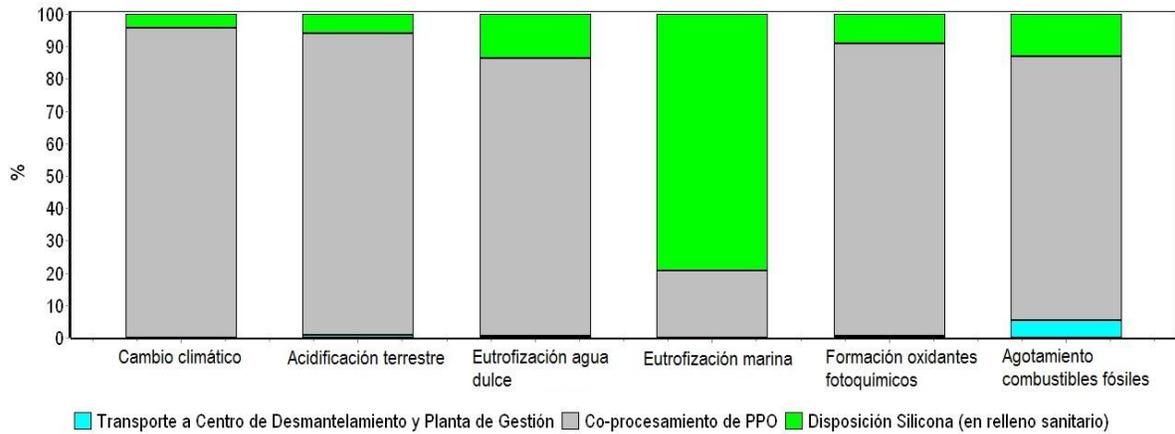
**Figura 8-23 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida del marco metálico de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**



**Figura 8-24 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de las capas intermedias de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**

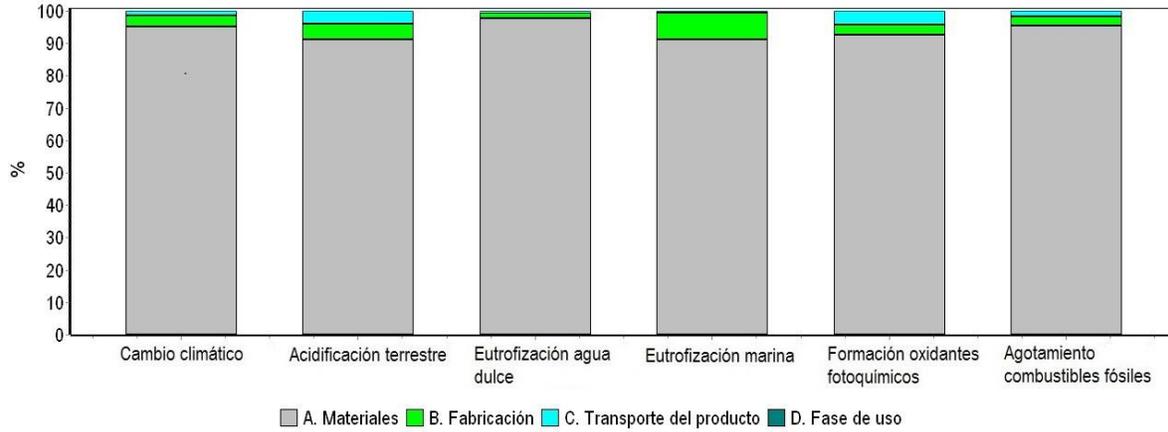


**Figura 8-25 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la cubierta posterior de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**



**Figura 8-26 Evaluación de impacto ambiental de la fase de fin de vida de la caja de conexiones de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**

**Apéndice 7. Resultados de la Evaluación de Impacto Ambiental en SimaPro para las fases de extracción de materiales, fabricación, transporte y uso**



**Figura 8-27 Evaluación de impacto ambiental de la fase de extracción, fabricación, transporte y uso de un panel fotovoltaico de silicio policristalino con la recuperación de los materiales.**

## **9 ANEXOS**

## **Anexo 1. Características y propiedades de los componentes del panel fotovoltaico de silicio cristalino**

*Sosa, cal y sílice:* este está compuesto por un 70% de SiO<sub>2</sub>, 15% de Na<sub>2</sub>O y un 10% de CaO. Se le adiciona entre un 1 y 4% de MgO para prevenir la desvitrificación y también se les incorpora de un 0.5 a 1.5% de alúmina para aumentar su duración y su resistencia química. Este es el vidrio de fabricación más corriente y constituye alrededor del 90% de todo el vidrio producido. Se utiliza para vidrios planos, y objetos prensados y soplados. A continuación en el Cuadro 9-1 se muestra algunas propiedades del vidrio (Blanco, s.f)

**Cuadro 9-1 Propiedades del vidrio (Sosa, Cal y Sílice) utilizado en la capa frontal de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Densidad específica (g/cm <sup>3</sup> )	2.48
Temperatura de fusión (°C)	1500-1600
Conductividad térmica (W/mK)	1
Coeficiente de expansión térmica (M/K)	8.5
Calor específico (J/gK)	0.84
Resistencia al choque térmico (K)	8.4

Elaborado por Blanco. (s.f)

*Aluminio Anodizado*: mediante un proceso electrolítico se forma sobre el aluminio una capa de protección de  $Al_2O_3$ . (TDA Anodizado S.A, s.f) En el Cuadro 9-2 se muestran las propiedades del aluminio anodizado.

**Cuadro 9-2 Propiedades del Aluminio Anodizado utilizado en los marcos de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

Propiedades	Valor
Densidad específica ( $g/cm^3$ )	2.5-3
Dureza Ms	7-8
Dureza Hv	300-600
Punto de fusión ( $^{\circ}C$ )	2100
Calor específico (J/gK)	0.200
Tasa de expansión térmica	$5 \times 10^{-4}$
Conductividad térmica	0.05-0.015 (C.G.S)

Elaborado por Mackenzie & Totten. (2003)

*Etil-vinil-acetato*: la fórmula química es ( $nC_6H_{10}O_2$ ). Consiste de un material termoplástico formado por una cadena de etileno que contiene de 5 a 50% de acetato de vinilo; donde sus propiedades van a depender de su estructura (contenido y distribución de vinil acetato, densidad de reticulación, peso molecular y la cristalinidad). (Leiva & Torres, 2007) A continuación en el Cuadro 9-3 se pueden observar las propiedades principales del EVA utilizado para los módulos fotovoltaicos.

**Cuadro 9-3 Propiedades del Etil-Vinil-Acetato utilizado en el encapsulante de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

Propiedades	Valor
Densidad específica ( $g/cm^3$ )	0.955-0.960
Punto de fusión ( $^{\circ}C$ )	~76
Conductividad térmica (W/mK)	0.27
Calor específico (J/gK)	2.8

Elaborado por RenewSys. (2014)

*Polivinilo Fluoruro*: la fórmula química es  $(C_2H_3F)_n$ . A continuación en el Cuadro 9-4 se pueden observar las propiedades principales de la película de Polivinilo Fluoruro utilizada en los paneles fotovoltaicos.

**Cuadro 9-4 Propiedades del Polivinilo Fluoruro utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

Propiedades	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.38-1.72
Temperatura de uso continuo (°C)	-70-107
Punto de fusión (°C)	190

Elaborado por Ebnesajjad. (2012)

*Tereftalato de Polietileno*: la fórmula química es  $(C_{10}H_8O_4)_n$ . A continuación en el Cuadro 9-5 se pueden observar las propiedades principales de la película de Polivinilo Fluoruro utilizada en los paneles fotovoltaicos.

**Cuadro 9-5 Propiedades del Tereftalato de Polietileno utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

Propiedades	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.37
Temperatura de distorsión térmica a una carga de 1.82 MPa (°C)	85
Coefficiente de expansión térmica (cm/cm)	$7 \times 10^{-5}$
Calor específico (J/gK)	1

Elaborado por Bridson. (1999)

*Silicio*: ver el Cuadro 9-6 para las propiedades principales del Silicio.

**Cuadro 9-6 Propiedades el silicio utilizado en las celdas de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Punto de fusión (K)	1687
Densidad específica (g/cm <sup>3</sup> )	2.329
Conductividad térmica (W/mK)	149
Coefficiente de expansión térmica (1/mK)	2.56 x 10 <sup>6</sup>
Calor específico (J/gK)	0.705

Elaborado por Lehto, Lindroos, Motooka, T & Tilli. (2010)

*Óxido de Polifenileno*: la fórmula química es (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>O)<sub>n</sub>. A continuación en el Cuadro 9-7 se pueden observar las propiedades principales de la película de Polivinilo Fluoruro utilizada en los paneles fotovoltaicos.

**Cuadro 9-7 Propiedades del Óxido de Polifenileno utilizado en la cubierta trasera de los paneles fotovoltaicos cristalinos**

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.06
Temperatura de distorsión térmica a una carga de 1.82 MPa (°C)	190
Coefficiente de expansión térmica (cm/cm)	5.2 x 10 <sup>-5</sup>

Elaborado por Bridson. (1999)

**Anexo 2. Costos de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio cristalino, según PV Cycle en el 2011**

**Cuadro 9-8 Costo de gestión de paneles fotovoltaicos**

<b>Costo unitario por logística (€)</b>	<b>Costo unitario por tratamiento y reciclaje (€)</b>	<b>Costo unitario total (€)</b>
150.00	140.00	290.00

Elaborado por HTWT. (2012)

**Cuadro 9-9 Costo unitario de logística, pre-tratamiento y reciclaje, ingresos por venta de fracciones resultantes y balance neto**

<b>Costo económico por logística y reciclaje (por tonelada) (€)</b>	<b>Ingresos por reciclaje de materiales (por tonelada) (€)</b>	<b>Costos netos (por tonelada) (€)</b>
290.00	2105.00	-1815.00

Elaborado por HTWT. (2012)

### Anexo 3. Datos del panel fotovoltaico de silicio policristalino

**Cuadro 9-10 Descripción del panel fotovoltaico de silicio policristalino utilizado como muestra**

<b>Tipo de tecnología</b>		silicio multicristalino (policristalino)
<b>Marca</b>		Yingli Solar (Empresa China)
<b>Modelo</b>		YL245P-29b
<b>Dimensiones</b>		largo 1650 mm, ancho 990 mm, y altura 40 mm
<b>Área</b>		1.6335 m <sup>2</sup>
<b>Materiales de construcción</b>	<b>Cubierta frontal</b>	material vidrio templado bajo en hierro, con espesor de 3.2mm
	<b>Celda</b>	60 celdas del material silicio multicristalino, con una dimensión de 156mm x 156 mm. Con un número de barras de 2 a 3.
	<b>Encapsulante</b>	material Etil Vinil Acetato (EVA)
	<b>Marco</b>	Material aleación de aluminio anodizado, color plata, el color de la anodización es claro. El sellado de los bordes es con silicona o cinta.
	<b>Caja de conexiones</b>	con un grado de protección $\geq$ IP65
	<b>Cableado</b>	con un largo de 1100mm con un área de sección transversal de 4mm <sup>2</sup>
	<b>Conector enchufable</b>	tipo MC4, con un grado de protección IP67 (YT1208)
	<b>Peso Teórico (kg)</b>	
<b>Peso real medición 1 (kg) *</b>		18.5
<b>Peso real medición 2 (kg) **</b>		18.5

\*Medición realizada en el CIVCO el día 30 de setiembre del 2015

\*\*Medición realizada en el CTTM el día 5 de noviembre del 2015

Elaborado por Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. (s.f)

#### Anexo 4. Especificaciones técnicas del horno eléctrico

**Cuadro 9-11 Datos técnicos del horno eléctrico utilizado para los tratamientos térmicos del panel fotovoltaico**

Marca	Modelo	Rango de temperatura (°C)	Potencia (W)	Corriente (A)	Tensión (V)
Precision Scientific Group	18EG/E	225	1420	11.8	120

## Anexo 5. Datos para el análisis de inventario de entrada del proceso de fabricación del panel en China

Tab5.1.8.2.1 Unit process data of the photovoltaic laminate and panel production in China (CN) ; red added exchanges compared to Jungbluth et al. (2012) [38].

Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	photovoltaic panel, single-Si, at plant	photovoltaic panel, multi-Si, at plant	photovoltaic laminate, single-Si, at plant	photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
				CN	CN	CN	CN			
				1 m2	1 m2	1 m2	1 m2			
product										
photovoltaic panel, multi-Si, at plant	CN	1	m2	0	1	0	0			
photovoltaic panel, single-Si, at plant	CN	1	m2	1	0	0	0			
photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	CN	1	m2	0	0	0	1			
photovoltaic laminate, single-Si, at plant	CN	1	m2	0	0	1	0			
photovoltaic panel, multi-Si, at plant	US	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, single-Si, at plant	US	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	US	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, single-Si, at plant	US	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, multi-Si, at plant	APAC	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, single-Si, at plant	APAC	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	APAC	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, single-Si, at plant	APAC	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, single-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, single-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, multi-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic laminate, ribbon-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
photovoltaic panel, ribbon-Si, at plant	RER	1	m2	0	0	0	0			
technosphere										
electricity, medium voltage, production	ENTSO	0	kWh	-	-	-	-	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
ENTSO, at grid										
electricity, medium voltage, at grid	CN	0	kWh	3,73E+0	3,73E+0	3,73E+0	3,73E+0	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
electricity, medium voltage, at grid	US	0	kWh	-	-	-	-	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
electricity, medium voltage, at grid	JP	0	kWh	-	-	-	-	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
natural gas, burned in industrial furnace	RER	0	MJ	-	-	-	-	1	1.14	(3,3,1,1,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
low-NOx > 100kW										
diesel, burned in building machine	GLO	0	MJ	8,75E-3	8,75E-3	8,75E-3	8,75E-3	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
infrastructure										
photovoltaic panel factory	GLO	1	unit	4,00E-6	4,00E-6	4,00E-6	4,00E-6	1	3.02	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
tap water, at user	RER	0	kg	5,03E+0	5,03E+0	5,03E+0	5,03E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
tempering, flat glass	RER	0	kg	8,81E+0	8,81E+0	8,81E+0	8,81E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
wire drawing, copper	RER	0	kg	1,03E-1	1,03E-1	1,03E-1	1,03E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
cells										
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	RER	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, ribbon-Si, at plant	RER	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	CN	0	m2	-	9,35E-1	-	9,35E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, single-Si, at plant	CN	0	m2	9,35E-1	-	9,35E-1	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	US	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, single-Si, at plant	US	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, multi-Si, at plant	APAC	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
photovoltaic cell, single-Si, at plant	APAC	0	m2	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)

materials	aluminium alloy, AlMg3, at plant	RER	0	kg	2.13E+0	2.13E+0	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	nickel, 99.5%, at plant	GLO	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	brazing solder, cadmium free, at plant	RER	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	tin, at regional storage	RER	0	kg	1.29E-2	1.29E-2	1.29E-2	1.29E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	lead, at regional storage	RER	0	kg	7.25E-4	7.25E-4	7.25E-4	7.25E-4	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	silver, at regional storage	RER	0	kg	-	-	-	-	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	diode, unspecified, at plant	GLO	0	kg	2.81E-3	2.81E-3	2.81E-3	2.81E-3	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	0	kg	2.38E-2	2.38E-2	2.38E-2	2.38E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	solar glass, low-iron, at regional storage	RER	0	kg	8.81E+0	8.81E+0	8.81E+0	8.81E+0	1	1.24	(1,4,1,3,3,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	copper, at regional storage	RER	0	kg	1.03E-1	1.03E-1	1.03E-1	1.03E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	RER	0	kg	2.95E-1	2.95E-1	2.95E-1	2.95E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	ethylvinylacetate, foil, at plant	RER	0	kg	8.75E-1	8.75E-1	8.75E-1	8.75E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	polyvinylfluoride film, at plant	US	0	kg	1.12E-1	1.12E-1	1.12E-1	1.12E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	RER	0	kg	3.46E-1	3.46E-1	3.46E-1	3.46E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	silicone product, at plant	RER	0	kg	1.22E-1	1.22E-1	1.22E-1	1.22E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	acetone, liquid, at plant	RER	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	auxiliary materials	methanol, at regional storage	CH	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
		vinyl acetate, at plant	RER	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
		lubricating oil, at plant	RER	0	kg	-	-	-	-	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
		corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	0	kg	7.63E-1	7.63E-1	7.63E-1	7.63E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
		1-propanol, at plant	RER	0	kg	1.59E-2	1.59E-2	1.59E-2	1.59E-2	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)
EUR-flat pallet		RER	0	unit	5.00E-2	5.00E-2	5.00E-2	5.00E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
hydrogen fluoride, at plant		GLO	0	kg	6.24E-2	6.24E-2	6.24E-2	6.24E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
isopropanol, at plant		RER	0	kg	1.47E-4	1.47E-4	1.47E-4	1.47E-4	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
potassium hydroxide, at regional storage		RER	0	kg	5.14E-2	5.14E-2	5.14E-2	5.14E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
soap, at plant		RER	0	kg	1.16E-2	1.16E-2	1.16E-2	1.16E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
transport		transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	5.85E+0	5.85E+0	5.64E+0	5.64E+0	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, cells 500km
		transport, freight, rail	RER	0	tkm	4.25E+1	4.25E+1	4.12E+1	4.12E+1	1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km
disposal		disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	CH	0	kg	3.00E-2	3.00E-2	3.00E-2	3.00E-2	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Alsema (personal communication) 2007, production waste
		disposal, polyvinylfluoride, 0.2% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.12E-1	1.12E-1	1.12E-1	1.12E-1	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal of the panel after life time
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.64E+0	1.64E+0	1.64E+0	1.64E+0	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal of the panel after life time	
	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	CH	0	kg	1.61E-3	1.61E-3	1.61E-3	1.61E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2	CH	0	m3	5.03E-3	5.03E-3	5.03E-3	5.03E-3	1	1.13	(1,4,1,3,1,3); Calculation, water use	
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	1.34E+1	1.34E+1	1.34E+1	1.34E+1	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); Calculation, electricity use	
	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	-	-	-	-	1	2.09	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	transport, aircraft, freight	RER	0	tkm	-	-	-	-	1	2.09	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	-	kg	8.06E-3	8.06E-3	8.06E-3	8.06E-3	1	1.61	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	
	Carbon dioxide, fossil	-	-	kg	2.18E-2	2.18E-2	2.18E-2	2.18E-2	1	1.29	(3,4,3,3,1,5); de Wild-Scholten (2014) Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data Collection (Table 37)	

(Frischknecht, Itten, Sinha, de Wild-Scholten, et al, 2015)

Anexo 6. Matriz energética de Costa Rica en el año 2015

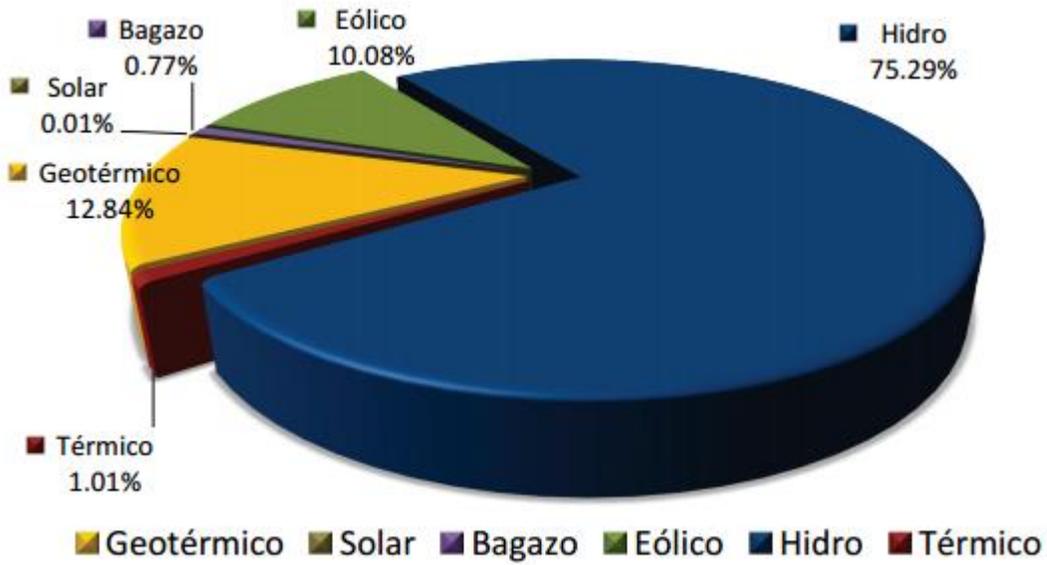


Figura 9-1 Distribución de la producción bruta de energía en Costa Rica (GWh) por tipo de fuente en el año 2015. Elaborado por Instituto Costarricense de Electricidad. (2015)