



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO

Ing. Rony José Herrarte Estevez

Asesorado por el Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra

Guatemala, julio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE
SILICIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. RONY JOSÉ HERRARTE ESTEVEZ

ASESORADO POR EL ING. BENEDICTO ESTUARDO MARTÍNEZ GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, JULIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--|
| DECANA | Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| DIRECTOR | Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| EXAMINADOR | Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque |
| SECRETARIO | Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de marzo de 2019.

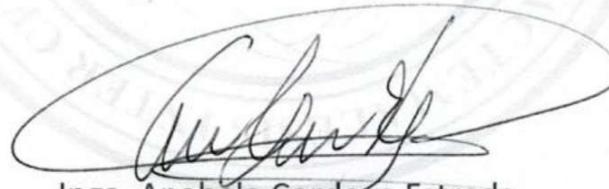


Ing. Rony José Herrarte Estevez

DTG. 204.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO**, presentado por el Ingeniero **Rony José Herrarte Estevez**, estudiante de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2020.

AACE/asga

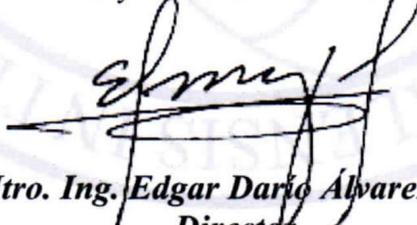
Guatemala, Julio de 2020

EPPFI-859-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO”** presentado por el Ingeniero **Rony José Herrarte Estevez** quien se identifica con Carné **201890440** quien correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Gestión Industrial** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Julio de 2020

EEPFI-858-2020

Como Coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO”** presentado por el **Ingeniero Rony José Herrarte Estevez** quien se identifica con Carné **201890440**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, 15 de agosto de 2020

EEPFI-860-2020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Rony José Herrarte Estevez** quien se identifica con carné **201890440** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“GESTIÓN INTEGRAL DE DESECHOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO”** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Benedicto Estuardo Martínez
Maestro en Energía y Ambiente
Col. 4157

Mtro. Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi madre** Lizette Estevez Rodríguez, por su amor incondicional, enorme y eterno.
- Mi hermana** Mariana Herrarte Estevez, por su amistad, apoyo y soporte durante toda mi vida.
- Mi sobrina** Jimena Aguilar Herrarte, por la alegría, el cariño y la inocencia que cautivan mi corazón.
- Mi amiga** Natalia Rodas Ralda, por su amistad, su compañía y todos los momentos de distracción durante estos dos años. Que nuestra amistad dure para toda la vida.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por abrirme las puertas y permitirme ser parte de esta comunidad de profesionales. |
| Facultad de Ingeniería | Por las enseñanzas que me permitieron obtener mi título de Ingeniero Mecánico. |
| Escuela de Estudios de Postgrado | Por la calidad de las enseñanzas que tuve durante el estudio de la maestría. |
| Universidad del Valle de Guatemala | Por ser mi <i>alma mater</i> que me formó como profesional, sus enseñanzas de ética y calidad. |
| Guillermo Callén Álvarez | Por ser el vínculo con Depro Solar que me permitió acceder a los paneles para la investigación realizada. |
| Job Lima | Ingeniero de la empresa Depro Solar que me donó dos paneles solares para poder estudiarlos. |
| José Divas | Ingeniero de la empresa COPENSA, S.A., por acceder a darme información |

del reciclaje de paneles en
Guatemala.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO..... | IX |
| RESUMEN | XIII |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | XV |
| OBJETIVOS | XVII |
| RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO | XIX |
| INTRODUCCIÓN | XXI |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1.1. Características del panel fotovoltaico de silicio | 1 |
| 1.1.1. Células solares de silicio monocristalino..... | 3 |
| 1.1.2. Células solares de silicio policristalino | 5 |
| 1.1.3. Características mecánicas de un panel fotovoltaico | 6 |
| 1.1.4. Materiales..... | 7 |
| 1.1.4.1. Silicio | 7 |
| 1.1.4.2. EVA (etileno acetato de vinilo)..... | 8 |
| 1.1.4.3. Arsénico | 9 |
| 1.1.4.4. Vidrio templado | 9 |
| 1.1.5. Tiempo de vida | 10 |
| 1.2. Gestión de desechos | 11 |
| 1.2.1. Desechos electrónicos | 11 |
| 1.2.2. Desechos tóxicos..... | 13 |
| 1.3. Gestión de desechos de paneles fotovoltaicos | 14 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.3.1. | Procesos de reciclaje de paneles solares | 15 |
| 1.3.2. | Reciclado de paneles a base de silicio..... | 15 |
| 1.4. | Impacto de los desechos de paneles fotovoltaicos | 16 |
| 1.4.1. | Impacto a la salud humana | 17 |
| 1.4.1.1. | Acetato de vinilo (EVA)..... | 17 |
| 1.4.1.2. | Silicio | 18 |
| 1.4.1.3. | Aluminio..... | 19 |
| 1.4.2. | Impacto al medio ambiente | 21 |
| 1.4.2.1. | Aluminio..... | 21 |
| 2. | ESTUDIO DEL MERCADO NACIONAL DE PANELES FOTVOLTAICOS | 23 |
| 3. | DESMANTELAMIENTO DE PANELES FOTVOLTAICOS | 27 |
| 3.1. | Caracterización del panel de 50 W | 27 |
| 3.1.1. | Procedimiento mecánico | 28 |
| 3.2. | Caracterización del panel de 40 W | 31 |
| 3.2.1. | Procedimiento mecánico | 31 |
| 3.2.2. | Procedimiento térmico | 33 |
| 3.3. | Costo energético para el procesamiento de los paneles solares..... | 40 |
| 4. | CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES | 41 |
| 5. | RESULTADOS | 51 |
| 6. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 57 |
| | CONCLUSIONES | 59 |

| | |
|-----------------------|----|
| RECOMENDACIONES | 61 |
| REFERENCIAS | 63 |
| APÉNDICES..... | 67 |
| ANEXOS..... | 77 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Elementos de un panel solar fotovoltaico..... | 2 |
| 2. | Células solares de silicio monocristalino..... | 4 |
| 3. | Tipos de paneles fotovoltaicos..... | 6 |
| 4. | Carátula de ficha técnica de panel | 7 |
| 5. | Paneles importados por año | 23 |
| 6. | Especificaciones del primer panel | 27 |
| 7. | Panel fotovoltaico de 50 W | 28 |
| 8. | Desmantelamiento de la caja de conexiones | 29 |
| 9. | Desmantelamiento del marco de aluminio | 30 |
| 10. | Especificaciones del segundo panel | 31 |
| 11. | Herramientas de corte del marco de aluminio | 32 |
| 12. | PVF eliminado de la parte posterior del panel | 34 |
| 13. | Parte trasera del panel luego del horno a 250 °C..... | 35 |
| 14. | Muestras luego de tratamiento térmico en mufla..... | 36 |
| 15. | Resultado segunda muestra después de mufla..... | 39 |
| 16. | Muestras en máquina Rigaku NEX-QC+ | 41 |
| 17. | Análisis de rayos X en obleas de silicio | 42 |
| 18. | Porcentajes detectados en obleas de Silicio..... | 42 |
| 19. | Porcentajes en masa de obleas de silicio | 43 |
| 20. | Porcentajes en masa de vidrio..... | 44 |
| 21. | Porcentajes en masa de barras colectoras | 45 |
| 22. | Pronóstico de importaciones anuales..... | 51 |
| 23. | Porcentaje en peso de los componentes en un panel solar | 52 |

| | | |
|-----|---|----|
| 24. | Esquema de gestión integral de desechos | 56 |
|-----|---|----|

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Valores para cálculo del crecimiento de importaciones | 25 |
| II. | Porcentajes en masa de obleas de silicio | 43 |
| III. | Porcentajes en masa de vidrio | 44 |
| IV. | Porcentajes en masa de barras colectoras | 45 |
| V. | Matriz de gestión de cada componente..... | 47 |
| VI. | Material recuperado | 49 |
| VII. | Peso de material en panel JINKO..... | 50 |
| VIII. | Porcentaje de elementos químicos | 53 |
| IX. | Matriz de gestión de desechos de paneles | 54 |
| X. | Matriz de gestión de desechos de paneles | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| °C | Grado centígrado |
| hh:mm:ss | Horas, minutos y segundos |
| kg | kilogramo |
| kWh | Kilowatt hora |
| kW/m² | Kilowatt por metro cuadrado |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| mm² | Milímetro cuadrado |
| mm:ss | Minutos y segundos |
| nm | Nanómetro |
| P | Potencia |
| \bar{x} (símbolo) | Promedio |
| <i>x</i> | Año |
| <i>y</i> | Cantidad de importaciones |
| <i>w nm</i> | Vatio |
| % | Porcentaje |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------|--|
| Barras colectoras | Barras delgadas rectangulares impresas en la parte delantera y posterior de las celdas solares para permitir la conductividad eléctrica. |
| Corriente alterna | Corriente eléctrica variable en la que las cargas eléctricas cambian el sentido del movimiento de manera periódica. |
| EVA | Etileno vinil acetato. Polímero termoplástico usado para encapsular las celdas solares en los paneles fotovoltaicos. |
| Fotón | Partícula elemental responsable del fenómeno electromagnético. |
| Fotovoltaico | Capacidad de convertir energía solar en energía eléctrica. |
| FRX | Fluorescencia de rayos X. |
| Metal pesado | Elemento químico metálico que tiene una alta densidad y que se considera tóxico a bajas concentraciones. |

| | |
|------------------------------|--|
| IEC | La Comisión Electrotécnica Internacional, más conocida por sus siglas en inglés: IEC, es una organización de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. |
| ISO | Organización Internacional de Normalización. Organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización. |
| Mufla | Horno electrónico utilizado cuando se requieren temperaturas mayores a los 200 °C. |
| PVF | Fluoruro de polivinilo. Es un fluoropolímero semicristalino parcialmente fluorado, utilizado principalmente en los recubrimientos interiores de aviones y láminas en módulos fotovoltaicos. |
| Panel solar | Dispositivo que capta la energía de la radiación solar para su aprovechamiento. |
| Póliza de importación | Documento que legaliza el ingreso de mercancía al país de Guatemala. |
| Radiación infrarroja | Radiación electromagnética, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. |

| | |
|------------------------|--|
| Radiación solar | Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. |
| Rayos UV | Radiación ultravioleta. Radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 10 nm y los 400 nm. |
| Rayos X | Radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. |
| Semiconductor | Que tiene una resistencia apreciablemente más alta que la de los buenos conductores e inferior a la de los aisladores, la cual decrece al aumentar la temperatura. |
| Tedlar | Marca registrada comercialmente de fluoruro de polivinilo, usadas para proteger las celdas solares. |
| TÜV | Organización Certificadora Alemana. |
| Ziploc | Marca registrada comercialmente para un tipo de bolsa plástica reutilizable que cuenta con un mecanismo de sello. |

RESUMEN

El objetivo es determinar una gestión integral de los desechos de los paneles fotovoltaicos de silicio para evitar la contaminación del suelo y aprovechar los materiales reutilizables o reciclables. Para lograrlo se tomó un panel solar de silicio para separar sus componentes y analizar su composición; a continuación, se estableció cuáles partes se pueden reutilizar o reciclar; se determinó la existencia de componentes tóxicos y se estableció cómo deben procesarse los componentes. Con esto se puede determinar el beneficio ambiental con una correcta gestión.

Se procedió a realizar una caracterización de un panel solar fotovoltaico de silicio. Con herramientas manuales se separaron las piezas principales del panel solar: el marco de aluminio, la caja de conexiones y el sándwich vidrio, silicio y etileno vinil acetato (EVA). Para separar los componentes de vidrio, silicio y EVA entre sí, se utilizó un proceso térmico. Para ellos se utilizó una mufla electrónica. Se realizó un análisis fisicoquímico por fluorescencia de rayos X (FRX) de las obleas de silicio, el vidrio y las conexiones metálicas para determinar sus componentes químicos y así evaluar su posible reciclaje y definir su toxicidad.

Se requirió una temperatura de casi 500 °C para separar el vidrio del silicio; durante el procedimiento el EVA se evapora. Debido a que el vidrio mostró tener elementos tóxicos, antimonio, entonces, este no se presta para un reciclaje convencional; pero se puede considerar una reutilización si se logra separar del silicio sin tener que dividirlo en partes. Para obtener el aluminio solo se requiere de un proceso mecánico que consta de separar por medio de herramientas básicas los marcos de aluminio del resto del panel solar.

El proceso térmico para separar el silicio, el vidrio y las barras colectoras toma 1 hora y 15 minutos. Los marcos de aluminio son el principal material reciclable de los paneles solares porque presentan bajo costo para su obtención y son 100 % reciclable. La caja de conexiones no puede ser reciclada, pero sí puede ser reutilizada si no es dañada.

El vidrio mostró tener un 4.06 % de antimonio, por lo que debe ser tratado como un material tóxico. Las barras colectoras presentaron tener 7.38 % de arsénico, por lo que también deben ser tratadas como un material tóxico. Al realizar la gestión de los desechos de los paneles solares, puede evitarse que cerca de 425,618 kg de material tóxico contaminen el suelo, lo cual considera únicamente los paneles solares importados durante el año 2018, a los cuales hay que sumarle el volumen de paneles importados en los siguientes años.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el 12 de julio de 2017, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, reportó 1,893 usuarios auto productores con excedentes de energía (UAEE) (CNEE, 2017). Este número seguirá en aumento, en parte gracias a la disminución de su costo. Actualmente, en Guatemala no existe un plan para desechar correctamente los paneles viejos. Por lo que terminan en un vertedero con el resto de la basura.

Tampoco, en Guatemala existe un plan concreto para el reciclaje de componentes electrónicos y los pocos centros de reciclaje de electrónicos no contemplan el reciclaje de los paneles fotovoltaicos. Para producir una cantidad suficiente de energía eléctrica cada usuario necesita varios paneles fotovoltaicos además de que cada uno tiene al menos un tamaño de 1 metro de ancho por 1.60 metros de alto (El Mundo de los Paneles Solares, 2018), lo cual significa que en unos años habrá un gran volumen de paneles desechados.

El problema no es solo el gran volumen de los paneles, sino que tienen un tiempo de vida útil de 20 a 25 años, luego de los cuales se deben reemplazar por nuevos debido a que no es factible repararlos. Así que cuando se dañen lo harán todos casi al mismo tiempo.

Todos los paneles fotovoltaicos están formados por silicio o telurio de cadmio. En Guatemala, los paneles de silicio son los más comercializados. Estos componentes son tóxicos para las personas y animales, así como, dañinos para el medio ambiente.

Además, de los componentes tóxicos, están los componentes electrónicos y otros materiales no biodegradables que de no ser reciclados o reutilizados solo se volverán parte de la basura que ya está generando suficientes problemas de contaminación. El uso de paneles como fuente de energía solar tiene como uno de sus principales objetivos ayudar a la reducción de la contaminación a partir de la utilización de fuentes de energía renovable y amigable con el medio ambiente. Por lo anterior, que se pretende asegurar que los paneles fotovoltaicos desechados no se vuelvan parte del problema.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿cómo realizar una gestión integral de los desechos de los paneles fotovoltaicos de silicio?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué partes de los paneles fotovoltaicos se pueden reutilizar o reciclar?
- ¿Cómo deben procesarse los componentes tóxicos?
- ¿Cómo se pueden reciclar y reutilizar los componentes de los paneles?
- ¿Qué beneficio ambiental se obtiene de este proceso?

OBJETIVOS

General

Determinar la gestión integral de los desechos de los paneles fotovoltaicos de silicio.

Específicos

1. Seleccionar las partes de los paneles fotovoltaicos que se pueden reutilizar o reciclar.
2. Establecer cómo deben procesarse los componentes tóxicos para disminuir la contaminación ambiental.
3. Detallar cómo deben ser reciclados y reutilizados los componentes de los paneles.
4. Determinar el beneficio ambiental con una correcta gestión.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación es de tipo cuantitativa descriptiva, ya que analiza y describe los compuestos que conforman los paneles fotovoltaicos de silicio; también, describe qué componentes pueden ser reciclados o reutilizados y cuáles son tóxicos.

Actualmente, en Guatemala no existe un plan de tratamiento adecuado de residuos de paneles fotovoltaicos. La importación de paneles solares a Guatemala ha ido en aumento, así como el número de empresas que comercializan e instalan paneles solares en hogares e industrias. En recientes años se han instalado las primeras plantas fotovoltaicas y se espera que en los próximos años se instalen nuevas. La mayoría de los paneles solares que actualmente son desechados, corresponden a paneles que provinieron defectuosos de fábrica y debido a que el costo de enviarlos de vuelta es alto, las empresas prefieren desecharlos.

Se realizó un estudio del mercado nacional de paneles fotovoltaicos para determinar la cantidad que se comercializan anualmente en Guatemala. Para ello se utilizó el portal electrónico de la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), donde se puede realizar una búsqueda de pólizas de importación. Se realizó una búsqueda por concepto de panel solar y se registró la cantidad de importaciones; se ordenó cronológicamente la información para determinar el volumen de paneles solares que ingresan anualmente a Guatemala; por ende, se puede pronosticar el crecimiento de importaciones en los próximos años.

Se procedió a realizar una caracterización de un panel solar fotovoltaico de silicio. Se obtuvo un panel solar dañado de fábrica. Con una cinta métrica y un vernier se midieron las dimensiones generales del panel solar; también, se pesó con una balanza digital. Por medio de herramientas manuales se procedió al desmantelamiento del panel solar. Se separaron las piezas principales del panel solar, los cuales son el marco de aluminio, la caja de conexiones y el sándwich vidrio, silicio y EVA, que no puede ser separado manualmente. Con una balanza digital se pesó cada material separado.

Para separar los componentes de vidrio, silicio y EVA entre sí, se utilizó un proceso térmico, a través de una mufla electrónica. Debido al tamaño reducido de la mufla, primero se tuvo que cortar el vidrio en tamaños que cupieran en esta. Dentro de la mufla se llevó el material a la temperatura necesaria para que el EVA se evapore y poder separar el silicio del vidrio. Se midió la temperatura de la mufla, se realizaron mediciones con láser térmico y se tomó el tiempo necesario para quemar por completo el EVA.

Se prosiguió con el análisis fisicoquímico por fluorescencia de rayos X (FRX) de las obleas de silicio, el vidrio y las conexiones metálicas para determinar sus componentes químicos para evaluar su posible reciclaje y definir su toxicidad.

Con los datos obtenidos, realizó un análisis del debido procesamiento de los residuos de los paneles fotovoltaicos. Se evaluó entre la posibilidad de ser reciclados, reutilizados, desechados de forma segura en los vertederos o la necesidad de ser procesados debido a la toxicidad.

Por último, con los datos recabados anteriormente, se realizó una evaluación del beneficio ambiental; para lo cual se determinaron los porcentajes de cada material separado según su peso versus el peso total del panel. Se estimó qué porcentaje de cada material puede ser recuperado y, por último, determinar cuánto material puede ser recuperado.

INTRODUCCIÓN

Todo panel solar fotovoltaico tiene aproximadamente un tiempo de vida óptimo de 25 años. Se espera que aumente la cantidad de paneles en todo el territorio guatemalteco año tras año. Lo que significa que en un tiempo no muy lejano habrá un gran número de paneles que serán desechados. Los paneles están compuestos de materiales tóxicos que contienen arsénico y antimonio, también de materiales reciclables como el aluminio y vidrio. Actualmente, en Guatemala, no se tiene un programa para el procesamiento de los desechos de paneles solares.

Para evitar esta contaminación se propone un protocolo a seguir para asegurar una correcta gestión de los paneles solares fotovoltaicos que define los materiales que se pueden reutilizar o reciclar y cómo realizar el proceso; se definen los materiales que contienen elementos tóxicos; y, finalmente, se determinará el proceso correcto para el desecho de los materiales restantes. Con esto se busca disminuir significativamente el volumen de desechos y evitar la posible contaminación ambiental.

Se determinó que un panel solar tiene un 75 % de vidrio, 15 % de aluminio, 2.5 % de silicio, 1.1 % de plástico y el resto de los materiales no son recuperables. En los materiales, por medio de un análisis de FRX, se encontraron elementos tóxicos, antimonio y arsénico que se encontraron en el vidrio y las barras colectoras por lo que deben ser tratados como materiales tóxicos. Se determinó que el aluminio es el principal material reciclable de un panel solar, la caja de conexiones es reutilizable, el silicio se puede reciclar, pero se necesita que exista en Guatemala una industria que pueda hacerlo.

Se obtuvo un panel solar de silicio que estaba dañado de fábrica y se prosiguió a desmantelarlo. Se procedió a realizar una caracterización de un panel solar fotovoltaico de silicio. Con una sierra de mano y un desarmador de cabeza plana, se separaron el marco de aluminio y la caja de conexiones del sándwich conformado por el vidrio, el silicio, las barras colectoras, PVF y el EVA. Para separar los componentes de este sándwich se requirió de un proceso térmico. Para ello se utilizó una mufla electrónica la cual se llevó a 500 °C. Una vez separados los elementos principales, se realizó un análisis fisicoquímico por fluorescencia de rayos X (FRX) de las obleas de silicio, el vidrio y las barras colectoras para determinar sus componentes químicos y así evaluar su posible reciclaje y definir su toxicidad.

En el capítulo 1, se hizo una revisión bibliográfica sobre las características del panel fotovoltaico de silicio, la gestión de desechos electrónicos y tóxicos, las normas de gestión de desechos de paneles fotovoltaicos en otros países y el impacto de los desechos de paneles fotovoltaicos. En el capítulo 2, se investigó la cantidad de paneles solares importados a Guatemala en los últimos 6 años lo que permitió estimar la cantidad de paneles fotovoltaicos vendidos en Guatemala y, finalmente, se calculó el crecimiento de importaciones de paneles solares para los próximos años.

En el capítulo 3, se determinó el proceso para la caracterización de los paneles fotovoltaicos, para esto se realizó el desmantelamiento del panel fotovoltaico, se determinaron las herramientas necesarias, los tiempos de cada proceso y se midieron y pesaron los componentes. En el capítulo 4 se realizó un análisis de FRX para la caracterización de los elementos de cada componente para establecer la existencia de elementos tóxicos; se estableció el apropiado reciclaje de materiales y la correcta gestión de materiales tóxicos. Por último, en el capítulo 5 se exponen los resultados y en el capítulo 6 se discuten.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Características del panel fotovoltaico de silicio

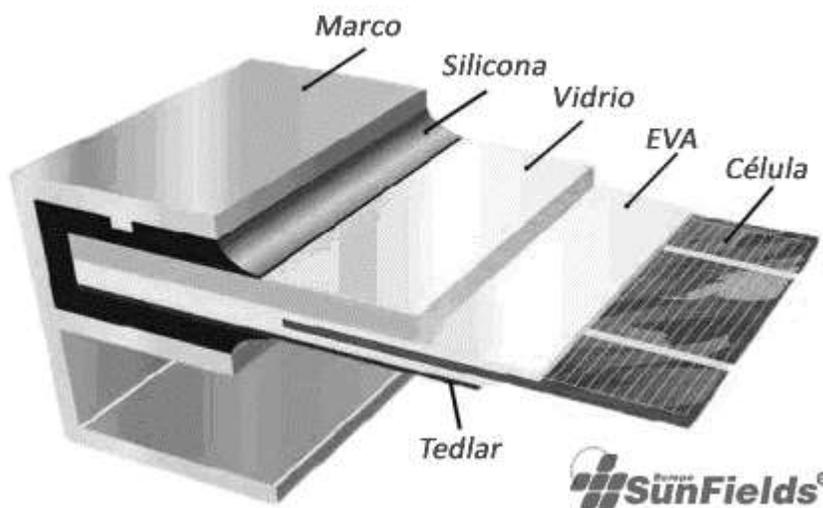
Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en energía eléctrica, una partícula luminosa con energía (fotón) se transforma en una energía electromotriz (voltaica), de ahí su nombre, fotovoltaico. La conversión fotovoltaica es el proceso por el cual la energía solar se transforma directamente en electricidad (Renovetec, 2018, párr. 13).

La forma en que los paneles fotovoltaicos funcionan es cuando los fotones chocan e ionizan el material; en este caso el silicio, genera que los electrones exteriores se desliguen del enlace atómico que los unía. Ya que este material es semiconductor, los electrones se mueven en una misma dirección lo que genera una corriente eléctrica. Las celdas de panel solar de silicio no tienen una eficiencia perfecta. La pérdida de eficiencia es debida, en parte, porque parte la luz solar que impacta es reflejada; otra cantidad de la luz solar (el rango infrarrojo) no tiene la suficiente energía para que pueda ser aprovechada para convertirla en energía eléctrica y otra cantidad de la luz solar transmitida (el rango ultravioleta) se convierte en energía térmica el cual ya no puede ser aprovechado como energía eléctrica (Solar Energy Industries Association, 2018).

Existen una gran variedad de tipos de paneles fotovoltaicos, que pueden ser especificados tanto por su disposición electrónica, así como por la forma en que estructuralmente está configurada e incluso por su apariencia estética. En general, las células solares fotovoltaicas se encuentran recubiertas entre dos láminas de EVA (etileno-vinilo-acetato); luego, estas dos láminas son protegidas

por una capa de vidrio en la parte frontal y en la parte trasera por un polímero termoplástico (uno de los materiales más utilizados es el Tedlar®); en algunas ocasiones se utiliza una segunda capa de vidrio cuando dentro del diseño se espera que exista algo de traslucida del panel. Todo el conjunto es normalmente sujetado en su lugar por un marco de aluminio anodizado que le da la protección y resistencia necesaria para soportar las diferentes condiciones climáticas a las que estará expuesto y también es la que permite anclar el panel a sus soportes (Perpiñán, 2012).

Figura 1. **Elementos de un panel solar fotovoltaico**



Fuente: SunFields (2017). *Laminación, curado y enmarcado de un panel solar.*

Una configuración eléctrica muy común hasta hace unos años empleaba 36 células en serie para obtener módulos con potencias comprendidas en el rango 50W –100W con tensiones cercanas a los 15V en funcionamiento. Estos módulos eran particularmente adecuados para su acoplamiento con baterías de tensión nominal 12V en los sistemas de electrificación rural.

Con el protagonismo abrumador de los sistemas fotovoltaicos de conexión a red, esta configuración ha perdido importancia. Ahora son frecuentes los módulos de potencia superior a los 200W y tensiones en el rango 30V–50V (Perpiñán, 2012, p. 55).

Existen gran variedad paneles solares pero los más comúnmente comercializados son los que están conformados del silicio monocristalino, de silicio policristalino o por silicio amorfo, que permite crear capas delgadas. “Estas siguen siendo las 3 tecnologías más utilizadas ya que son las que se instalan en el 90 % de los sistemas fotovoltaicos actuales” (Gomez, 2017, párr. 10).

La norma internacional *IEC 61215 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval* es la se utiliza para aprobar los módulos solares fotovoltaicos a partir de silicio. En esta norma se pueden obtener los requerimientos de diseño y fabricación para los módulos fotovoltaicos que garantiza un largo periodo de tiempo de funcionamiento ante cualquier tipo de condición climática (Perpiñán, 2012).

1.1.1. Células solares de silicio monocristalino

“Las células solares hechas de silicio monocristalino son fácilmente reconocibles por un color uniforme externo y apariencia uniforme, lo que indica silicio de alta pureza” (Aarre, 2018, párr. 8). En la figura 2 se muestra un tipo muy común de estos paneles.

Figura 2. **Células solares de silicio monocristalino**



Fuente: Solamat (2018). *Panel solar Eoply EP125M/72-190W 35V Monocristalino.*

Para obtener las celdas se utilizan barras cilíndricas de silicio. Un trabajo extra que se les hace a estas barras consiste en eliminar cuatro costados de las barras; esto hace que las obleas (así se le llama a cada célula solar) ocupen menos espacio por área logrando mejorar la utilidad y disminuir el precio de cada oblea, lo que le da una apariencia muy característica a esta clase de paneles. Por otro lado, los paneles fotovoltaicos monocristalinos tienen obleas completamente rectangulares sin los bordes redondeados (Aarre, 2018).

Si se comparan las eficiencias entre los paneles fotovoltaicos monocristalinos y los policristalinos se encontrará que los monocristalinos tienen una mayor eficiencia ya que el silicio del que están hechos tiene una mejor calidad. Normalmente, los paneles fotovoltaicos monocristalinos tienen eficiencias que van del 15% al 20%. Por ser los más eficientes se pueden formar paneles más compactos y que permiten ahorrar espacio si se comparan paneles con la misma potencia de salida. Los paneles de silicio monocristalino usualmente tienen más durabilidad en comparación a los otros tipos. El tiempo de vida que la mayoría de los fabricantes de paneles fotovoltaicos de silicio policristalino es de al menos 25 años. Otra ventaja de estos tipos de paneles es

que en condiciones de poca luz tiene un mejor desempeño en comparación a los policristalinos (Aarre, 2018).

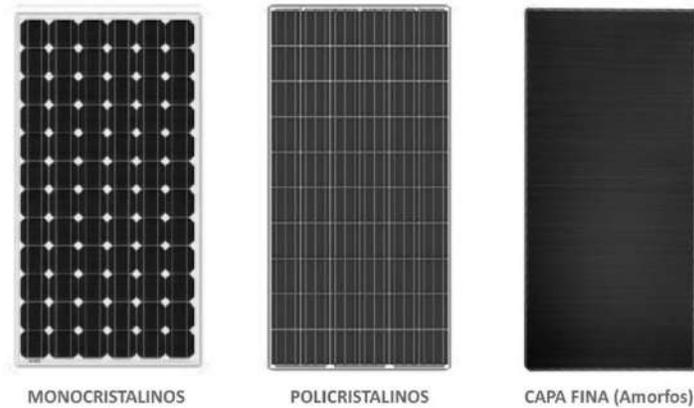
1.1.2. Células solares de silicio policristalino

En la etapa de fabricación una de las principales diferencias entre los paneles policristalinos y los monocristalinos, radica en que los policristalinos no tienen un proceso extra llamado proceso de Czochralski. El proceso utiliza un cristal base para que el silicio, en estado líquido, inicie a unirse al cristal base para formar un lingote. En cambio, para el silicio policristalino, el silicio líquido sólo se deposita en molde con la forma final deseada en el cual se deja enfriar para luego cortar las obleas en forma cuadrada (Aarre, 2018).

Los paneles policristalinos tienen un rendimiento de laboratorio cercano al 19%, y su rendimiento comercial oscila entre 13 y el 15%. A pesar de tener un rendimiento menor, los paneles policristalinos tienen un menor precio que los monocristalinos y un mejor comportamiento a altas temperaturas, con lo que bajo estas condiciones pueden generar más energía que el resto de los paneles (Serrano, 2017, párr. 9).

Se puede notar que la fabricación a partir de paneles de silicio policristalino es un proceso es más simple y su costo, por ende, es menor. También, se puede notar que la cantidad de silicio desperdiciado en el proceso es significativamente menor en comparación con el del monocristalino. Los paneles fotovoltaicos de silicio policristalino presentan una tenacidad al calor levemente inferior que los mostrados paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino. Esto significa que los paneles de silicio policristalino muestran una menor vida útil cuando se encuentran ante altas temperaturas, pero esta característica es casi imperceptible y los usuarios finales suelen no notarlo (Aarre, 2018),

Figura 3. **Tipos de paneles fotovoltaicos**



Fuente: Serrano (2017). *Tipos de paneles fotovoltaicos.*

1.1.3. Características mecánicas de un panel fotovoltaico

Para explicar cómo está conformado uno de los paneles más comunes se utilizará la ficha técnica de un panel fotovoltaico que se comercializa en Guatemala. El panel solar fotovoltaico descrito a continuación es un Eagle PERC 72 de marca JINKO Solar. Certificado por fábrica según ISO9001:2008, ISO14001:2004 y OHSAS18001 y los productos certificados según IEC61215 y IEC61730.

El panel solar está conformado por 72 celdas de silicio monocristalino de 156 × 156 mm organizadas en 6 filas de 12 celdas cada una. Sus dimensiones son de 1956 × 992 × 40 mm y pesa 26.5 kg. El vidrio frontal es un vidrio templado bajo en hierro de 4.0 mm de espesor con revestimiento antirreflejante y de alta transmisión. El marco es de aleación de aluminio anodizado, la caja de conexiones es clasificada tipo IP67. Los cables de conexión tienen una sección transversal de 4.0 mm² y longitud de 900 mm aprobado por el certificado TÜV.

Figura 4. Carátula de ficha técnica de panel



Fuente: Jinko Solar (20187). *Eagle PERC 72 340-360 Watt*.

1.1.4. Materiales

Los principales materiales de los cuales están conformados los paneles solares pueden contener materiales contaminantes, también pueden ser reciclados por ende es importante estudiar su composición.

1.1.4.1. Silicio

El silicio es el elemento electropositivo más abundante de la corteza terrestre. Es un metaloide con marcado lustre metálico y sumamente quebradizo. Por lo regular, es tetravalente en sus compuestos, aunque algunas veces es divalente, y es netamente electropositivo en su comportamiento químico. Además, se conocen compuestos de silicio pentacoordinados y hexacoordinados (Lenntech, s.f., párr. 1).

Las células fotovoltaicas para la conversión directa de energía solar en eléctrica utilizan obleas cortadas de cristales simples de silicio de grado electrónico (Lenntech, s.f., párr. 2).

El silicio natural contiene 92.2% del isótopo de masa número 28, 4.7% de silicio-29 y 3.1% de silicio-30. Además de estos isótopos naturales estables, se conocen varios isótopos radiactivos artificiales. En su forma más pura, el silicio es un semiconductor intrínseco, aunque la intensidad de su conducción se ve enormemente incrementada al introducir pequeñas cantidades de impurezas. El silicio se parece a los metales en su comportamiento químico. Es casi tan electropositivo como el estaño y mucho más positivo que el germanio o el plomo (Lenntech, s.f., párr. 3).

Por su cantidad, la cantidad de silicio en la tierra es, por mucho mayor en comparación con otro elemento, sólo es superado por el oxígeno. Aquel representa hasta un 27.72 % de la superficie terrestre; en comparación, el oxígeno representa un 46.6 %, y tercer elemento más abundante es el aluminio, que representa un 8.13 % (Lenntech, s.f.).

1.1.4.2. EVA (etileno acetato de vinilo)

En la industria solar, la encapsulación más común es con etileno acetato de vinilo (EVA) reticulable. Con la ayuda de una máquina de laminación, las células se laminan entre películas de EVA en un vacío, que está bajo compresión. Una de las desventajas de las películas de EVA es que no es resistente a los rayos UV y, por lo tanto, se requiere un vidrio frontal protector para la protección UV. Para los módulos estándar que utilizan encapsulación de EVA, para el respaldo, usualmente se utiliza una capa de

compuesto Tedlar (Tedlar Poliéster Tedlar (TPT)), que es una película delgada y opaca (Rooij, 2011, párr. 2).

1.1.4.3. Arsénico

El arsénico es utilizado en gran variedad de aleaciones, pues ayuda a mejorar sus propiedades como la dureza y tenacidad al calor. Son muy utilizados como revestimiento de cables conductores por la dureza que les confieren. Es común encontrarlo en pequeñas cantidades en aleaciones con cobre, así como también para la producción de algunos tipos de vidrios, así como es un componente usado en algunos semiconductores. En estas aplicaciones en donde se utiliza el arsénico, los productos finales no pueden ser reciclados (Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, 2004).

Si se encuentra arsénico en los componentes es recomendado no intentar reciclarlo, puede ser altamente tóxico, se encuentre como revestimiento o como otro componente de una aleación metálica. En este caso se necesita de un centro de reciclado con conocimiento experto del manejo de componentes tóxicos. Lo anterior, debido a que el material puede lixiviarse fácilmente y su punto de ebullición de 615 °C, es considerablemente bajo (Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, 2004).

1.1.4.4. Vidrio templado

Usualmente, se utiliza un vidrio templado con un bajo contenido de hierro para dar protección al medio ambiente, a la vez que permite el paso de la luz y que esta no se refleje, incluyendo parte de los rayos ultravioleta e infrarrojos; el templado les confiere resistencia a las temperaturas extremas, tanto, altas como

bajas, y una resistencia a las condiciones climatológicas en toda época (Kim, Pampena, Goldsmidt, y Marcos, s.f.).

Si bien el vidrio que integra el panel lleva adosada una capa de EVA ($nC_6H_{10}O_2$), esto no impide su reciclado por fusión, dado que el EVA posee una temperatura de fusión próxima a los 76 °C, la cual está muy por debajo de la del vidrio (1500-1600 °C). Esto permite que el EVA se descomponga en CO y CO₂, pudiendo eliminarse junto con los restantes gases generados durante el proceso de fusión (Kim, Pampena, Goldsmidt, y Marcos, s.f., p. 3).

1.1.5. Tiempo de vida

Aunque muchos fabricantes garanticen solamente 25 años a sus paneles, estudios han calculado que la expectativa de vida puede llegar a ser de hasta 30 años antes de que dejen de funcionar. Durante los primeros 25 años existirá una disminución de su eficiencia. En los primeros 10 a 12 años se estima que la pérdida será de un 10 % y del 25 % a los 25 años. Es por esto por lo que la mayoría de los fabricantes garantizan hasta los 25 años únicamente. Sin embargo, en un uso real se han obtenido casos en los que después de 25 años la eficiencia se reduce, tan solo, entre 6 % a 8 %. Por ello se podría esperar que paneles solares pueda funcionar por mucho más tiempo de lo que los fabricantes estipulan. En el otro extremo, para los paneles de la más alta calidad se puede esperar que lleguen hasta los 30 años e incluso 40 años, antes de dejar de funcionar, pero la eficiencia irá en disminución (GreenMatch, 2017).

1.2. Gestión de desechos

Debido a que la tecnología de paneles solares es relativamente nueva no se ha creado, aun, muchos desechos que causen un problema para la gestión de estos y se han encontrado pocos estudios relacionados a este tipo de desechos por lo que se estudió el procesamiento de sus componentes, lo cual se muestra a continuación.

1.2.1. Desechos electrónicos

Al tener que desechar los aparatos eléctricos y electrónicos estos pueden causar altos niveles de contaminación, la mayoría de estos equipos son fabricados con materiales altamente contaminantes, entre otros: mercurio, fósforo, cadmio o bromo que. Si no se realiza una apropiada gestión, estos pueden producir grandes daños a la salud humana y también al medio ambiente (Fundación del Agua, 2018).

Los metales componen la sustancia principal de los residuos electrónicos y eléctricos. En vez de desecharlos en muchos casos se pueden reutilizar lo que disminuye costos y minimiza la necesidad de extraer más elementos de la tierra, una de las actividades humanas más contaminantes para el medio ambiente.

Para recuperarlos se requiere menos energía (10% menos, por ejemplo, en el caso del cobre) y se generan menos desechos (potencialmente, un 98% menos) que extrayéndolos directamente de la Naturaleza; sin olvidar que muchos de los materiales utilizados en electrónica (cobre, oro, plata o aluminio) son valiosos por sí mismos (Fundación del Agua, 2018, párr. 5).

Dentro del proceso de reciclaje es importante notar que el reciclaje de todo componente electrónico es de los más fáciles y económicos de esta industria. Es fácil separar mecánicamente todos los componentes e incluso las materias primas y hasta el 70 % puede ser reciclado para producir materias primas aprovechables (Fundación del Agua, 2018).

La certificación ISO 14001 tiene el propósito de apoyar la aplicación de un plan de manejo ambiental en cualquier organización del sector público o privado. Fue creada por la Organización Internacional para Normalización (International Organization for Standardization - ISO). Además de ISO 14001, existen otras normas ISO que se pueden utilizar como herramientas para proteger el ambiente, sin embargo, para obtener la certificación de protección al medio ambiente sólo se puede utilizar la norma ISO 14001. El grupo de normas ISO, que contiene diversas reglas internacionales que han sido uniformizadas y son voluntarias, se aplica ampliamente en todos los sectores de la industria (Andersen, 2003, p. 16).

Por ejemplo, en España sólo en los hogares se ha llegado a obtener hasta una tonelada de desechos electrónicos y se prevé que hasta el 75 % pudo haber sido reciclado. De acuerdo con el informe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, se estima que cada año se producen más de 40 millones de toneladas de desechos electrónicos. También, se reporta que este número va en aumento en un 15 % y un 30 % cada 5 años (Fundación del Agua, 2018).

SOLIRSA es una compañía en Costa Rica que ofrece una gestión integral de residuos eléctricos, electrónicos, de iluminación y de refrigeración segura y responsable, apegada a la normativa nacional e internacional vigente tanto en el campo laboral, como el social y el ambiental (Soluciones Integrales en Reciclaje, S.A., 2017, párr. 1).

E-Waste de Guatemala es una asociación no lucrativa 100 % guatemalteca dedicada a la conservación del medio ambiente por medio del manejo de residuos electrónicos, uno de sus objetivos principales es, “llevar a cabo programas de divulgación y educación, así como la implementación de campañas de acopio y selección de desperdicios electrónicos” (e-Waste Guatemala, 2009, párr. 1).

1.2.2. Desechos tóxicos

Los desechos sólidos tóxicos son un tipo de residuos peligrosos que pueden causar efectos nocivos sobre la salud de los seres humanos y otras especies de animales. En general, los desechos sólidos tóxicos pueden deteriorar desde la superficie terrestre, pasando a la cadena alimenticia y llegar al hombre (Reciclados y Demoliciones San Juan, 2016, párr. 1).

El principal problema de los desechos tóxicos es que son un puente para la proliferación de las bacterias y estas al ser liberadas al medio ambiente logran cubrir un área muy extensa. En especial si logran llegar a ríos, mares o incluso ser arrastradas por el viento. Otro gran problema de los residuos tóxicos es que tienden a tomar muchos años en ser descompuestos biológicamente y dejar de seguir causando males al medio ambiente y al ser humano, tienen la característica de que una vez ingerido por personas o animales no son desechados rápidamente, provocando malestares a la salud que deterioran al organismo, debido a las constantes enfermedades que causan (Reciclados y Demoliciones San Juan, 2016).

1.3. Gestión de desechos de paneles fotovoltaicos

Desde una forma muy general los paneles fotovoltaicos desechados aún son considerados dentro de la categoría de residuos generales. Tan solo en la Unión Europea se les da otra categoría; En Guatemala, se les ha dado a los paneles fotovoltaicos la categoría de residuos eléctricos esto bajo la directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE). Es por esto por lo que, solo en la Unión Europea existe una comisión encargada de velar por el correcto procesamiento de los residuos de los paneles fotovoltaicos bajo la directiva WEEE, además de otros marcos legales (GreenMatch, 2017).

El reciclaje de los paneles solares fotovoltaicos puede significar una oportunidad económica muy grande; hasta el grado que podría superar la suma de 15 mil millones de dólares para el año 2050, según el informe técnico elaborado por la Agencia de Energías Renovables (IRENA) y el programa fotovoltaico de la Agencia Internacional de la Energía (IEA-PVPS) (Mosquera, 2016, párr. 1).

En la Unión Europea todos los fabricantes de paneles solares se ven obligados a cumplir con una serie de requisitos legales y cumplir con estándares de reciclaje que garantizan que los paneles solares no sean otra carga más de contaminación para el medio ambiente (GreenMatch, 2017).

De hecho, si los procesos de reciclaje no se pusieran en marcha, habría 60 millones de toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos en vertederos para el año 2050; ya que todas las células fotovoltaicas contienen cierta cantidad de sustancias tóxicas, realmente se convertirían en una forma no tan sostenible de obtener energía (GreenMatch, 2017, párr. 8).

Se ha pronosticado que la producción de residuos a partir de paneles, cuyo volumen principal está conformado por vidrio, podrían llegar a ser de hasta 77 millones de toneladas en todo el mundo en los próximos 30 años (Mosquera, 2016). Es imprescindible que para esa fecha existan planes de mitigación como lo sería el reciclaje de estos.

1.3.1. Procesos de reciclaje de paneles solares

Como existen dos modelos más comúnmente utilizados para la configuración de paneles solares, y que ambos requieren procesos de reciclaje distintos. Para ambos tipos, el basado en silicón y el basado en película delgada, se deben generar técnicas propias de reciclaje a nivel industrial. Ya que los paneles de silicio son lo más comunes, es más importante definir una técnica de reciclaje para estos (GreenMatch, 2017).

Los estudios de investigación realizados sobre el tema del reciclaje de paneles solares han dado lugar a numerosas tecnologías. Algunos incluso alcanzan una sorprendente eficiencia de reciclaje del 96 % (GreenMatch, 2017, párr. 12).

1.3.2. Reciclado de paneles a base de silicio

La primera etapa del proceso de reciclaje de los paneles fotovoltaicos de silicio, tanto, policristalino como monocristalino, inicia con la separación de las piezas externas de los paneles, estos son el aluminio y el vidrio. Hasta un 95 % del vidrio extraído puede ser reutilizado, así también las partes metálicas que conforman la estructura pueden ser reutilizadas para nuevos paneles solares o ser reciclados también. Los componentes restantes pueden ser calentados hasta 500 °C en una unidad de procesamiento térmico para facilitar la separación de

cada compuesto. Debido a estas altas temperaturas, el EVA se evapora que deja así las celdas de silicio libres y listas para ser procesadas. “La tecnología de soporte garantiza que ni siquiera se desperdicia el plástico, por lo tanto, se reutiliza como fuente de calor para un procesamiento térmico adicional” (GreenMatch, 2017, párr. 9).

Después del procedimiento térmico, el equipo electrónico se aparta físicamente. El 80 % de ellos es fácilmente reutilizable, y el restante se debe refinar aún más. Las obleas de silicio recuperadas se limpian con un ácido. Las obleas que se hayan roto durante el proceso o durante su utilización se pueden fundir para reutilizarlas en la fabricación de nuevos módulos solares de silicio, con lo que se logra hasta un 85 % de silicio reciclado (GreenMatch, 2017).

A veces el vidrio está contaminado con los materiales que componen las capas intermedias, estos son más livianos y son eliminados por medio de un proceso de separación por vibración. Por último, el vidrio pasa a enjuagarse. El resultado del proceso es un vidrio puro; se recupera así hasta un 90 % del vidrio para una reutilización (GreenMatch, 2017).

1.4. Impacto de los desechos de paneles fotovoltaicos

Aunque no se ha estudiado a profundidad el impacto que los paneles solares puedan tener al medio ambiente y los seres vivos, si se conoce el impacto que cada uno de sus componentes tiene. El estudio de cada uno de estos permite generar un panorama del impacto que los paneles puedan tener conjunto.

1.4.1. Impacto a la salud humana

Primero se debe evaluar el impacto de los componentes de los paneles solares en el humano, esto se basa principalmente en pruebas realizadas con cada componente por separado.

1.4.1.1. Acetato de vinilo (EVA)

El EVA ha mostrado poca toxicidad de tipo agudo cuando es ingerida o por absorción dérmica, por el contrario, si es inhalado en altas concentraciones puede causar una irritación aguda y ser tóxico. “La exposición prolongada a la sustancia puede tener efectos irritantes o cáusticos sobre la piel y los ojos” (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011, p. 2).

En pruebas con conejos se ha visto que el EVA puede producir irritación o incluso el deterioro de la piel, y que el deterioro está relacionado con la duración del contacto. Las personas que hayan estado expuestas al EVA tienen principalmente irritación de la piel, ojos o incluso en el tracto respiratorio de forma local (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011).

Se ha encontrado que el acetato de vinilo tiene efectos genotóxicos in vitro, como por ejemplo aberraciones cromosómicas, micronúcleos y SCE, y se observaron mutaciones genéticas en células de mamíferos cultivadas. En estudios in vivo, tras dosis muy altas, únicas e intraperitoneales, se observaron micronúcleos en células de la médula ósea de ratón; pero no tras la exposición por inhalación o la administración de acetato de vinilo en el agua de bebida. El test de micronúcleos en células germinales (espermátidas) arrojó resultados negativos. La sustancia, por lo tanto, no está relacionada con mutaciones genéticas en células germinales bajo

condiciones de exposición laboral. El potencial carcinogénico del acetato de vinilo se manifiesta solamente cuando la exposición del tejido a acetaldehído es alta y cuando la proliferación celular es simultáneamente elevada. El riesgo de producir cáncer por acetato de vinilo, a concentraciones bajas, no irritantes, en el aire del lugar de trabajo, se muestra insignificante (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011, p. 7).

1.4.1.2. Silicio

El silicio puro es un material no reactivo, y no muestra tener la capacidad de producir fibrosis en el tejido pulmonar. Pero si se han encontrado leves lesiones en los pulmones de animales en los laboratorios, a los que se les inyectó silicio en polvo. El polvo muestra tener escasos efectos dañinos en los pulmones, tampoco existe seguridad de que produzca enfermedades significativas o sea tóxicas cuando la persona no se encuentra expuesta por un tiempo prolongado. Pero los cristales de silicio (también llamado dióxido de silicio) pueden causar grandes problemas de respiración. A pesar de esto, es muy poco probable que en los procesos comunes de producción de los paneles se genere dióxido de silicio (Lenntech, 2009).

Se ha detectado una relación entre altas exposiciones de silicio cristalino en el lugar de trabajo en los pacientes con cáncer de pulmón (especialmente cuarzo y cristobalita). “En estudios realizados a mineros, trabajadores con tierra de diatomeas, trabajadores del granito, trabajadores de cerámica, trabajadores de ladrillos refractarios y otros trabajadores se ha documentado una relación exposición-respuesta” (Lenntech, 2009, párr. 10).

Muchos estudios epidémicos han constatado que estadísticamente existe un significativo aumento un desequilibrio inmunológico, padecimientos autoinmunes e incluso de decesos en personas expuestas al silicio. “Estas enfermedades y trastornos incluyen escleroderma, artritis reumatoide, eritematosis sistémica y sarcoidosis” (Lenntech, 2009, párr. 11).

“Estudios epidemiológicos recientes han informado de asociaciones estadísticamente significativas de exposiciones ocupacionales a silicio cristalino con enfermedades renales y cambios renales subclínicos” (Lenntech, 2009, párr. 12).

El silicio cristalino puede causar mucho daño al sistema inmunitario, causando así infecciones micobacterianas (no tuberculosas, pero también tuberculosas) o fúngicas, especialmente en personas con constante contacto con el silicio (Lenntech, 2009).

La exposición prolongada con el silicio cristalino por vía respiratoria se puede asociar con bronquitis. Esta es una enfermedad crónica que obstruye los pulmones y produce enfisema pulmonar. Estudios epidemiológicos indican que en las personas que no fuman no se ven efectos o son menores (Lenntech, 2009).

1.4.1.3. Aluminio

La mayoría de las personas no absorbe aluminio por medio de la respiración. La cantidad de aluminio presente en el aire tiende a ser de 0.005 y 0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire, según la ubicación, las condiciones atmosféricas y del nivel de industria alrededor del área (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016).

La concentración de aluminio en aguas naturales (por ejemplo, lagunas, lagos, arroyos) generalmente es menor de 0.1 miligramos por litro (mg/L) de agua. La ingesta de aluminio a través del agua potable generalmente es baja. A veces el agua es tratada con sales de aluminio durante el proceso de producción de agua potable. Aun así, los niveles de aluminio generalmente no exceden 0.1 mg/L. En varias ciudades se han detectado concentraciones de aluminio en el agua potable de 0.4 a 1 mg/L (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016, párr. 27).

Una pequeña cantidad del aluminio que el ser humano inhala ingresa al organismo por los pulmones. Una pequeña parte del aluminio que ingreso a los pulmones entra al flujo sanguíneo. Una cantidad aún más chica del aluminio ingresa través de la piel, pero esto sucede solo si se da un contacto directo. La mayoría del aluminio sale rápidamente del cuerpo por medio de las heces. La otra parte, que entró al torrente sanguíneo, abandona también rápidamente el organismo en la orina (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016).

Inhalar un gran volumen de aluminio ha mostrado causar una serie de dificultades respiratorias como son la tos u otros males. Se ha detectado una disminución en el desempeño del sistema nervioso en personas que respiraron vapores que contenían aluminio o también el polvo de este. La ingesta de aluminio usualmente no está asociada con un malestar.

Algunos estudios han sugerido que la exposición a cantidades altas de aluminio puede causar enfermedad de Alzheimer, mientras que otros estudios no han encontrado evidencia de que esto ocurra. No se sabe con certeza si la exposición al aluminio produce enfermedad de Alzheimer

(Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016, párr. 42).

Algunas personas que sufren de enfermedad renal acumulan una gran cantidad de aluminio en sus cuerpos. La enfermedad del riñón impide la eliminación de aluminio en la orina. Algunas veces, estas personas desarrollaron enfermedades de los huesos o del cerebro que los doctores atribuyeron al exceso de aluminio (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016, párr. 43).

1.4.2. Impacto al medio ambiente

Los componentes de los paneles solares no sólo pueden ser dañinos para el ser humano, sino también para el medio ambiente. Por esto es importante estudiar el impacto de sus componentes para poder determinar el correcto procesamiento de estos.

1.4.2.1. Aluminio

Se puede encontrar aluminio de forma natural en el aire, como en el agua y el suelo. El trabajo de minería y la extracción aluminio mineral, la producción de metal de aluminio, aleaciones de este y otros compuestos llegan a producir grandes volúmenes de polvo de aluminio (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016).

“Cantidades pequeñas de aluminio se liberan al ambiente desde plantas de energía que utilizan carbón como combustible e incineradores. El aluminio no puede ser destruido en el ambiente. Solamente puede cambiar de forma o adherirse o separarse de partículas” (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016, párr. 16).

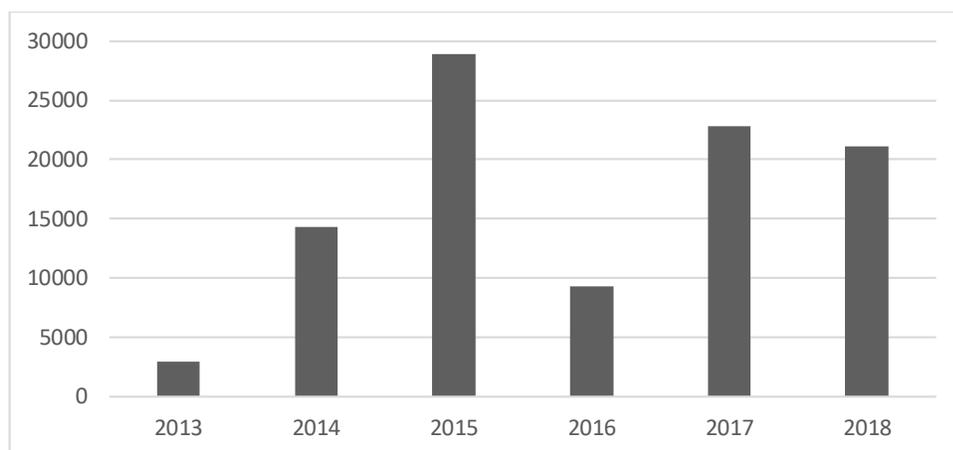
Las más diminutas partículas que aun flotan en el aire al final se depositan en suelo o luego son arrastradas por el agua. Pero las partículas más pequeñas permanecen en el aire por un tiempo más prolongado. “La mayoría de los compuestos que contienen aluminio no son muy solubles en agua a menos que el agua sea ácida o muy alcalina” (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016, párr. 20).

2. ESTUDIO DEL MERCADO NACIONAL DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Se realizó una búsqueda de los paneles importados a Guatemala por medio del sitio de internet de la Superintendencia de Administración Tributaria. En su portal de internet se puede realizar una búsqueda de las pólizas de importación, en la siguiente dirección: <https://portal.sat.gob.gt/portal/polizas-de-importacion/>

Los datos obtenidos por este medio fueron tabulados y ordenados cronológicamente para determinar la cantidad de paneles importados por cada año investigado. La cantidad de paneles contabilizados por año se pueden observar de la figura 5, a continuación.

Figura 5. Paneles importados por año



Fuente: elaboración propia.

Con estos datos se puede calcular el promedio (\bar{x}) de paneles importados anualmente. Para determinar el valor se utilizó la siguiente ecuación.

$$\bar{x} = \frac{\sum y}{n}$$

Donde n es el número de años evaluados, y es la cantidad de paneles importados por año.

A continuación, se describe el procedimiento de ajuste de los datos obtenidos a una línea recta denominado regresión lineal. Este procedimiento se utilizará para calcular el pronóstico de importaciones para un determinado. La ecuación de la regresión lineal es:

$$y = a + bx$$

Donde a es la ordenada y b es la pendiente de la ecuación y . Se calcularon con las siguientes ecuaciones.

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{n}$$

También, se determinó el crecimiento anual de importaciones con la siguiente ecuación:

$$c = \frac{b * n}{\sum y}$$

También, se calculó la varianza, con la siguiente ecuación. Esto estima con qué error se pronostica el número de paneles importados para cada año.

$$\sigma = \frac{\sum_i^n |y_i - \bar{x}|}{n}$$

Para calcular tanto a , b y c , se usaron los valores de la tabla I

Tabla I. **Valores para cálculo del crecimiento de importaciones**

| Año | Cantidad | | | | |
|-------------|-----------|----------------|----------------|-------------------|---------------|
| X | Y | X ² | Y ² | X*Y | |
| 2013 | 1 | 2975 | 1 | 8850625 | 2975 |
| 2014 | 2 | 14284 | 4 | 204032656 | 28568 |
| 2015 | 3 | 28873 | 9 | 833650129 | 86619 |
| 2016 | 4 | 9301 | 16 | 86508601 | 37204 |
| 2017 | 5 | 22829 | 25 | 521163241 | 114145 |
| 2018 | 6 | 21145 | 36 | 447111025 | 126870 |
| Suma | 21 | 99407 | 91 | 2101316277 | 396381 |

Fuente: elaboración propia.

Con los valores tabulados los valores calculados son:

$$\bar{x} = \frac{\sum 99,407}{6} = 16567.8\bar{3}$$

$$b = \frac{6 * 396,381 - 21 * 99,407}{6 * 91 - (21)^2} = 2,768.94$$

$$a = \frac{99,407 - 2,768.94 * 21}{6} = 6,876.53$$

$$y = 6,876.53 + 2,768.94 x$$

Ahora se puede estimar la cantidad de paneles importados para diferentes años, por ejemplo, para el año 2,030, $y = 53,948.56$ paneles importados. Con

esto se podría estimar que para el año 2,030 haya un total de 486,600 paneles en toda Guatemala.

Así mismo, se espera un crecimiento anual de importaciones de paneles del

$$c = \frac{2,768.94 * 6}{99,407} = 16.71\%$$

El cálculo de la desviación estándar se estimó como: $\sigma = \frac{46,287}{6} = 7,714.5$

3. DESMANTELAMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Para la caracterización de los paneles se contó con dos paneles de diferente fabricante y tamaño, lo cual permite comparar ambos procedimientos de desmantelamiento.

3.1. Caracterización del panel de 50 W

El primer panel desmantelado es un panel 50 W, con las medidas externas de 132 cm de largo, 34 cm de ancho y 4 cm de grosor y un peso de 5.7 kg (12.56 lb).

Figura 6. Especificaciones del primer panel



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Panel fotovoltaico de 50 W**



Fuente: elaboración propia.

Para el desmantelamiento y la separación de cada uno de los componentes del panel se realizó un procedimiento mecánico manual y un procedimiento térmico. A continuación, se detalla cada paso y el tiempo necesario para realizarlo.

3.1.1. Procedimiento mecánico

Primero, se removieron las cajas plásticas traseras de conexión. No todos los paneles cuentan con la misma cantidad de cajas de conexión, en este modelo se cuenta con dos, como se observa en la figura 8; tomó 3 minutos

aproximadamente, quitar cada una de las cajas. Para removerlos las herramientas utilizadas fueron:

- Cuchilla retráctil de mano
- Desatornillados plano de punta delgada

La cuchilla retráctil se utiliza para cortar parte del silicón con el que unió la caja de conexiones a la parte trasera del panel; también, permite meter la punta del desarmador en diferentes puntos de la caja. Con el desarmador se hizo palanca, como se muestra en la siguiente figura, para separarla por completo.

Figura 8. Desmantelamiento de la caja de conexiones



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se removi6 el marco de aluminio. En este modelo el marco era remachado, tenia 8 remaches en total. Tom6 unos 2.30 minutos aproximadamente por remache, 20 minutos en total. Las herramientas utilizadas fueron:

- Taladro el6ctrico
- Broca de metal
- Guantes
- Martillo
- desatornillador Philips (punta delgada)

El marco de aluminio a6n se encontraba unido al vidrio por una capa de silic6n utilizada, principalmente, para evitar el ingreso de agua al vidrio. Para lograr separar el marco, primero, se jal6 por las esquinas el marco para separarlo del vidrio. Se us6 el desarmador plano como palanca, lo que tom6 unos 10 minutos en total.

Figura 9. **Desmantelamiento del marco de aluminio**

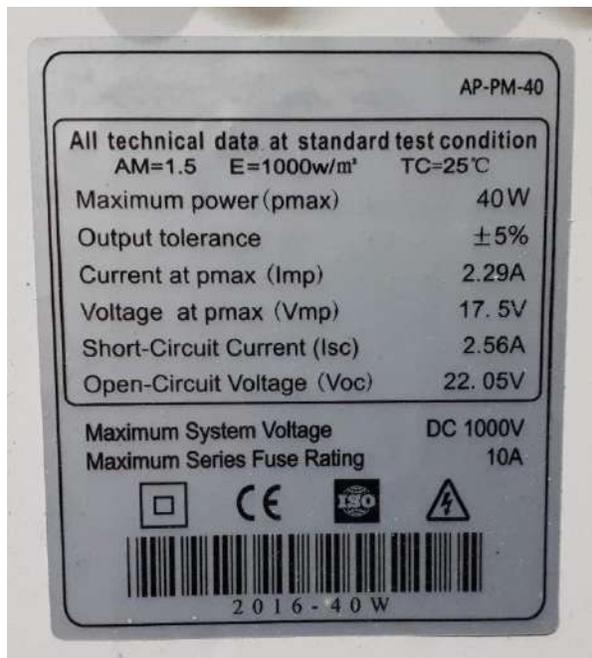


Fuente: elaboraci6n propia.

3.2. Caracterización del panel de 40 W

El segundo panel desmantelado fue un panel de 40 W, con las medidas externas de 62 cm (23" 3/8) de largo, 45.7 cm (18") de ancho y 3 cm de grosor con un peso de 3.145 kg (6.92 lb).

Figura 10. Especificaciones del segundo panel



Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Procedimiento mecánico

El marco trae una escuadra interna (4 en total), también de aluminio. Se cree que la escuadra fue troquelada para unirla al marco de aluminio por lo que no es posible separarla del mismo modo que con el panel anterior. Las herramientas utilizadas para este modelo fueron:

- Prensa de mesa
- Cierra metálica
- Cuchilla extraíble de mano
- Mazo de hule

La cierra metálica se introdujo en las esquinas del marco y se cortó la escuadra. Con la cuchilla se cortó el silicón para extraer el marco con golpes por el mazo de hule. Se tomó aproximadamente 4 minutos por escuadra, 16 minutos en total para separar el marco completamente.

Figura 11. **Herramientas de corte del marco de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Se removió la caja plástica trasera de conexión con el mismo procedimiento que con el panel de 50 W. Este modelo de panel sólo cuenta con una caja. También se tomó 3 minutos, aproximadamente, para quitar la caja. Para removerla las herramientas utilizadas fueron las mismas:

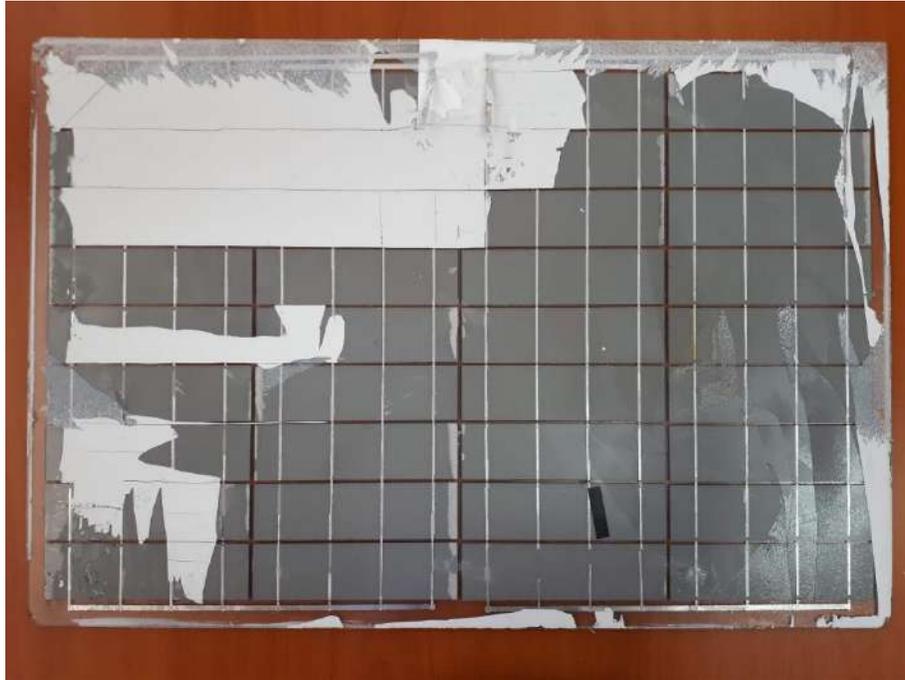
- Cuchilla retráctil de mano
- Desatornillados plano de punta delgada
-

3.2.2. Procedimiento térmico

Inicialmente, se intentó separar el PVF con una pistola de aire caliente cuya temperatura alcanza los 450 °C, y se logró calentar lo suficiente el recubrimiento de PVF trasero como para separarlo en parte, pero únicamente en un área muy pequeña, por lo que el procedimiento es muy tardado y además no se remueve el EVA completamente que une las obleas de silicio con el vidrio.

El segundo intento fue en un horno a 120 °C por un periodo de 30 minutos. Se logró calentar todo el papel plástico, pero igual se requirió fuerza y tiempo para extraer el máximo del PVF. Hubo partes que aún tienen el papel pegado a este. Esta temperatura no es suficiente como para eliminar o siquiera suavizar el EVA para poder separar el silicio del vidrio.

Figura 12. **PVF eliminado de la parte posterior del panel**



Fuente: elaboración propia.

El tercer intento fue en un horno a 250 °C (temperatura máxima a la que llega un horno común de cocina) por 30 minutos. De nuevo, se introdujo la mitad del panel. Con este intento sí se quemó el EVA, pero la temperatura no fue lo suficiente como para que se evaporara y eliminara. Al salir del horno el EVA estaba semiblando, lo suficiente como para separar el panel en partes, pero no lo suficiente como para separar el silicio del vidrio. Se usaron espátulas, pinzas, alicates, se probó de diferentes formas, pero no fue suficiente y eficiente. Además, la temperatura desciende rápido por lo que al poco tiempo ya se había vuelto a endurecer el EVA.

Figura 13. **Parte trasera del panel luego del horno a 250 °C**



Fuente: elaboración propia.

Según la investigación titulada Análisis del Ciclo de Vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica, esto no funcionó se continuó con la investigación y se encontró otro documento que menciona que para quemar por completo el EVA se debe llevar a 500 °C.

Se usó la mufla del Departamento de Química de la Universidad del Valle de Guatemala (ver figura 14 para referencia). Por el tamaño no se pueden introducir partes grandes, por lo que se introdujo en dos partes. Una donde el EVA no se había quemado aún y la otra donde ya se había quemado el EVA. Para probar si había alguna diferencia entre los dos métodos y si tal vez convenía hacerlo por etapas.

Cabe mencionar que el vidrio es templado por lo que no se puede cortar sin que se estalle (es decir que se separe en pequeñas piezas), pero como aún se encuentra bastante EVA no se separa por completo.

Se revisó el proceso cada 100 °C; en los primeros 200 °C no había ningún indicio visible; a las 300 °C ya se veía el EVA quemado, se empezó a ver humos salir de la superficie, similar a la prueba del horno a 250 °C; a los 450 °C empezó a salir fuego de la superficie del EVA; a los 465 °C ya había terminado de quemarse y visiblemente parecía que ya se había eliminado por completo el EVA y sólo quedaba el silicio y el vidrio. Se continuó hasta llegar a los 500 °C, pero una vez se alcanzó esa temperatura se detuvo la mufla y se dejó enfriar lentamente, ya que era obvio que el EVA se había quemado por completo.

Figura 14. **Muestras luego de tratamiento térmico en mufla**



Fuente: elaboración propia.

Las pruebas fueron exitosas debido a que efectivamente se eliminó todo el EVA, quedando únicamente el silicio y el vidrio. Se estima que no es necesario alcanzar los 500 °C; con llegar a los 450 °C se considera suficiente. Para verificar lo anterior, se realizó una segunda prueba. Cabe mencionar que tampoco hubo una diferencia entre la parte previamente quemada a 250 °C y la no antes tratada térmicamente, por lo que no es necesario realizar la primera etapa.

Para evaluar el beneficio ambiental se pesaron las muestras, tanto, antes como después del tratamiento térmico; los resultados se presentan a continuación.

Datos antes del tratamiento térmico:

- Muestra no quemada: 144.6 g
- Muestra quemada: 91.2 g
- Total: 235.8 g

Datos después del tratamiento térmico:

- Vidrio: 224.0 g (95 %)
- Silicio: 7.9 g (3.35 %)
- Metal: 2.7 g (1.145 %)
- Diferencia (EVA): 1.2 g (0.5 %)

La diferencia, que es el valor entre el peso total medido antes del tratamiento térmico y el peso de todos los componentes separados después del tratamiento térmico, se estima que es el peso del EVA, ya que es el único que se quema durante el proceso.

Los instrumentos con los que se realizaron las mediciones son:

- Balanza: Scout Pro 2000g
- Mufla: THERMOLYNE
- Sensor térmico: DIGI-SENSE 20250-05
- Cronometro del teléfono móvil

La temperatura inicial de la prueba fue a 34 °C y la temperatura objetivo a la que se estableció la mufla: 500 °C. El tiempo hasta llegar a 500 °C (valor mostrado en pantalla) fue de 21 minutos, 43 segundos y 12 milésimas, el tiempo total dentro de mufla: 1:13:13 hh:mm:ss. Este es el tiempo para llegar a 500 °C y bajar hasta temperaturas manejables para no dañar la mufla (no se puede abrir completamente a altas temperaturas sin sufrir daños).

Para verificar si lo observado en la primera prueba con la mufla, no es necesario llegar a 500 °C, se realizó una segunda prueba con más material. En la segunda prueba se colocó una muestra más grande y no quemada. De nuevo se estableció la mufla con una temperatura objetivo de 500 °C.

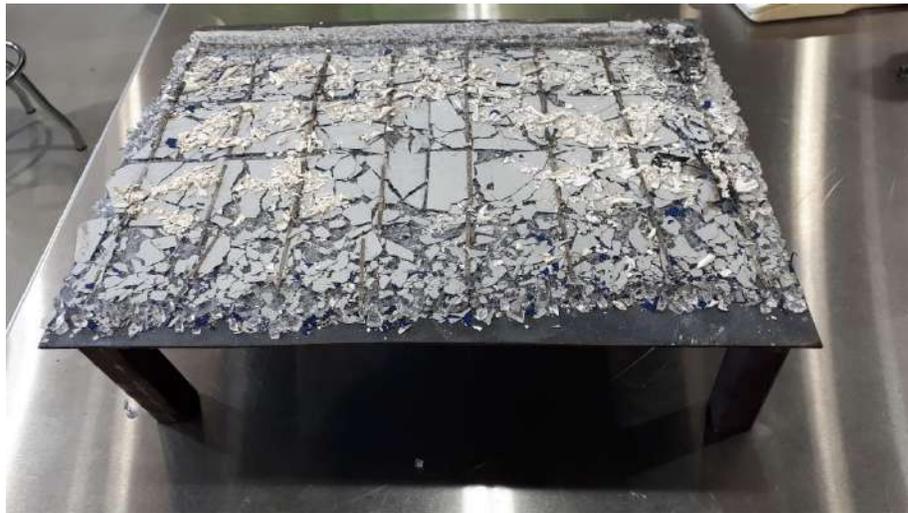
El peso de la muestra fue de 565 g y la temperatura inicial de 26 °C. En la segunda prueba se observó más detenidamente el proceso donde inició la llama y hasta donde finalizó. El inicio de la llama se dio a los 430 °C, aproximadamente, fue a los 46 minutos y la llama se apagó a los 470 °C aproximadamente, que sucedió a los 55 minutos de iniciado el proceso. Se apaga el horno a 496 °C 59:45 mm:ss. El silicio estaba visiblemente separado del vidrio y no había más EVA que quemar.

Peso de la muestra después del horno se presenta a continuación:

- Vidrio: 479 g (84.78 %)
- Silicio: 19 g (3.36 %)
- Metal: 11 g (1.85 %)
- Lo que no se pudo separar: 28 g (4.95 %)
- Diferencia (EVA): 28 g (4.9 5%)

En la segunda prueba por espacio y tiempo de uso del laboratorio no se pudo separar con tiempo y dedicación cada uno de los componentes y se tuvieron que guardar, juntos, en una bolsa Ziplock. Esto dificultó significativamente separarlos por lo que hubo una parte significativa que quedó mezclada.

Figura 15. Resultado segunda muestra después de mufla



Fuente: elaboración propia.

3.3. Costo energético para el procesamiento de los paneles solares

Para la separación de la caja de conexiones no se utilizó herramienta eléctrica, por lo que no existe un gasto energético. Para separar los marcos de aluminio se utilizó un barreno de 550 W, el proceso completo duró 20 minutos. Por lo que el gasto energético es de:

$$E_1 = P \cdot t = 0.55 \text{ kW} \cdot \frac{20}{60} \text{ h} = 0.18 \text{ kWh}$$

Para el tratamiento térmico se utilizó una mufla de 3.095 kW, el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada fue de 55 minutos. Debido a que la mufla tiene un espacio reducido 33 X 25 cm), para separar un panel completo (195 X 99 cm), este se debe dividir en 25 partes. El calor ganado dentro de la mufla separar una parte se puede, en parte, aprovechar. Primero, se debe dejar que la mufla se enfríe lo suficiente para abrirla sin dañarla. Esto se hizo cuando llegó a los 300 °C, lo que tomó aproximadamente 20 minutos. Para elevar la temperatura de 300 °C a 470 °C, se estima que tomará 21 minutos. El tiempo total que la mufla deberá calentar es de

$$t = 55 \text{ minutos} + 24 \cdot 21 \text{ minutos} = 559 \text{ minutos}$$

El gasto energético de la mufla será de:

$$E_2 = P \cdot t = 3.095 \text{ kW} \cdot \frac{559}{60} \text{ h} = 28.83 \text{ kWh}$$

El costo por kWh de EEGSA reportado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica es de 1.336747 Q/kWh. Por lo que el costo total del proceso de separación de los componentes será de:

$$\text{Costo} = (0.18 + 28.83) \text{ kWh} * 1.336747 \text{ Q/kWh} = 38.80$$

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

En el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar los elementos de los que están compuestas las obleas de silicio, el vidrio y las barras colectoras de las celdas solares (*solar cell busbar*), y establecer su adecuado procesamiento. La máquina utilizada fue una Rigaku NEX-QC+

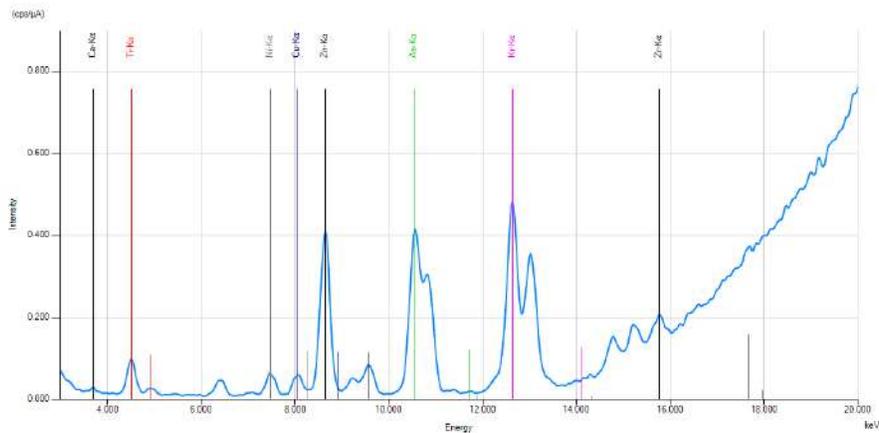
Figura 16. Muestras en máquina Rigaku NEX-QC+



Fuente: elaboración propia.

El análisis de cada componente da como resultado una imagen con los elementos detectados. Los porcentajes en masa de los elementos detectados se observan en las siguientes tablas.

Figura 17. Análisis de rayos X en obleas de silicio



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Porcentajes detectados en obleas de silicio

| Component | Analyzed value | Unit | Statistics error | Detection limit | Quantitation limit |
|-----------|----------------|-------|------------------|-----------------|--------------------|
| Si | 97.3 | mass% | | | |
| Cu | 0.0405 | mass% | 0.0004 | 0.0001 | 0.0004 |
| Pd | ND | mass% | | | |
| Pt | 0.0246 | mass% | 0.0005 | 0.0002 | 0.0006 |
| Rb | 0.0073 | mass% | <0.0001 | <0.0001 | 0.0001 |
| Ca | 1.02 | mass% | 0.0180 | 0.0242 | 0.0726 |
| Ag | 1.43 | mass% | 0.0012 | 0.0024 | 0.0073 |
| As | 0.0647 | mass% | 0.0003 | <0.0001 | 0.0002 |
| Kr | 0.0557 | mass% | 0.0002 | <0.0001 | <0.0001 |

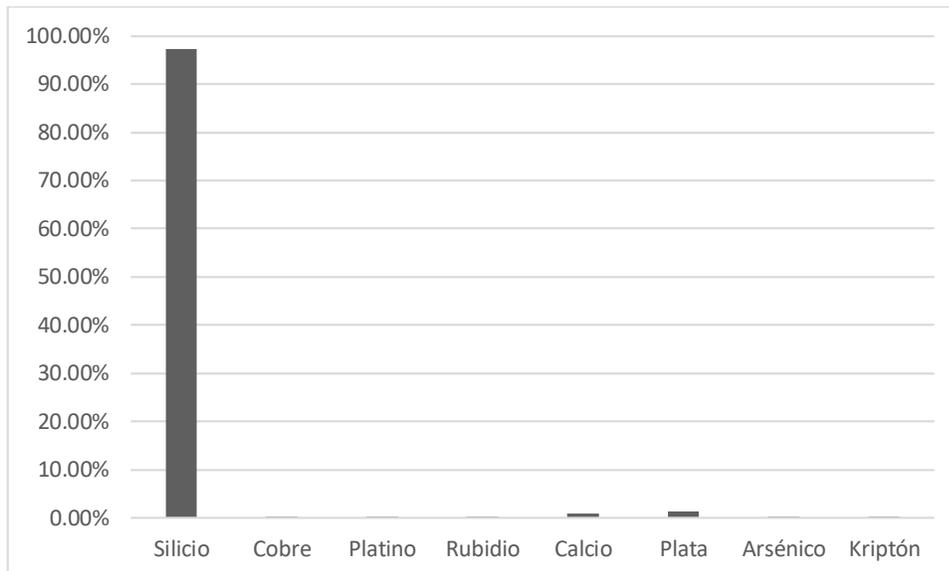
Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Porcentajes en masa de obleas de silicio**

| Componente | | Porcentaje |
|------------|----|------------|
| Silicio | Si | 97.30 % |
| Cobre | Cu | 0.04 % |
| Platino | Pt | 0.03 % |
| Rubidio | Rb | 0.01 % |
| Calcio | Ca | 1.02 % |
| Plata | Ag | 1.43 % |
| Arsénico | As | 0.06 % |
| Kriptón | Kr | 0.06 % |

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Porcentajes en masa de obleas de silicio**



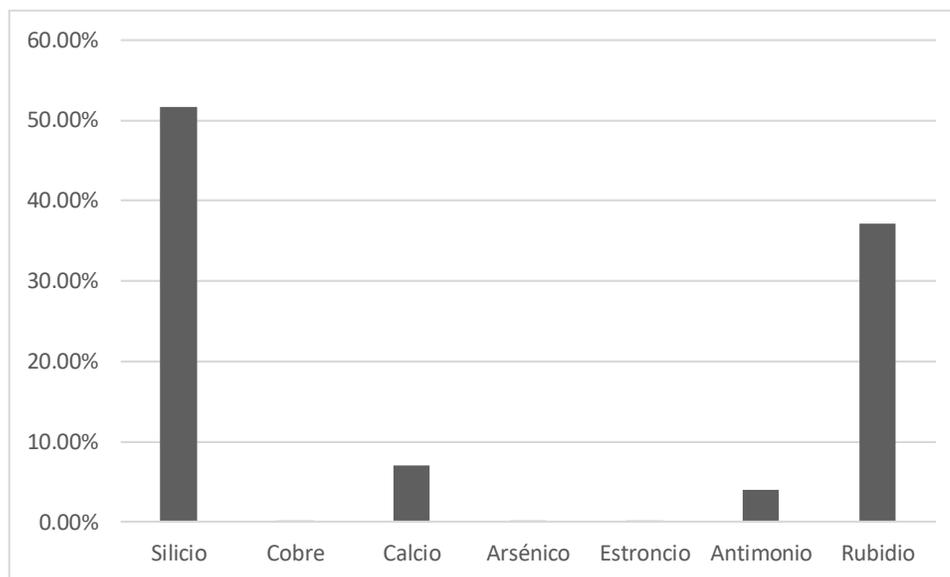
Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Porcentajes en masa de vidrio**

| Componente | | Porcentaje |
|-------------------|----|-------------------|
| Silicio | Si | 51.70 % |
| Cobre | Cu | 0.01 % |
| Calcio | Ca | 7.09 % |
| Arsénico | As | 0.44 % |
| Estroncio | Sr | 1.30 % |
| Antimonio | Sb | 4.06 % |
| Rubidio | Rb | 37.10 % |

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Porcentajes en masa de vidrio**



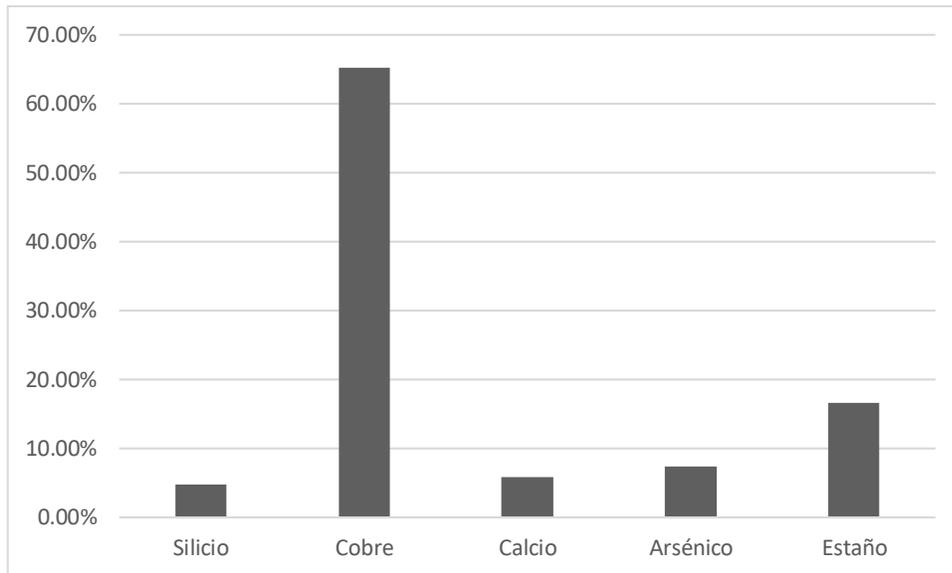
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Porcentajes en masa de barras colectoras**

| Componente | | Porcentaje |
|-------------------|----|-------------------|
| Silicio | Si | 4.75 % |
| Cobre | Cu | 65.30 % |
| Calcio | Ca | 5.91 % |
| Arsénico | As | 7.38 % |
| Estaño | Sn | 16.70 % |

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Porcentajes en masa de barras colectoras**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de las muestras de las barras colectoras demuestra que el material principal de conducción es el cobre. Este se usa por su alta conductividad. Para proteger el cobre y evitar cualquier oxidación usualmente son recubiertas de plata, pero en algunos modelos de paneles se prefiere el uso del estaño ya que reduce los costos de fabricación (Power From Sunlight, 2017)

De los elementos encontrados los que deben considerarse tóxicos, por ende, peligrosos, son el arsénico y el antimonio. Durante el proceso térmico de desmantelamiento de los paneles no existe peligro de contaminación por posibles gases ya que la temperatura de ebullición del arsénico es a los 614 °C, aproximadamente, y el antimonio se funde a los 630 °C, pero el tratamiento térmico se realiza debajo de los 500 °C. Así mismo, durante el proceso mecánico de desmantelamiento el arsénico no entra en contacto con la persona ya que aún está en las barras colectoras que se encuentran protegidas por el EVA.

Al considerar el arsénico y el antimonio como tóxicos, requieren una gestión para desechos peligrosos y según el estado con el que se obtienen, es decir, si pueden ser reutilizados y/o reciclados. En la tabla V, se determina la gestión adecuada para cada componente del panel evaluado.

Tabla V. **Matriz de gestión de cada componente**

| Componente | Reutilización | Reciclaje | Vertedero | Desecho tóxico |
|-------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Obleas de silicio | No | Sí | Sí | No |
| Vidrio | No | No | No | Sí |
| Barras colectoras | No | No | No | Sí |
| Marco de aluminio | Sí | Sí | Sí | No |
| Caja de conexión | Sí | No | Sí | No |
| EVA | No | No | No | No |
| PVF | No | No | Sí | No |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que en el vidrio y las barras colectoras se encontraron altos porcentajes de metales considerados tóxicos (arsénico y antimonio) no son considerados para el reciclaje, a menos de que se realice por expertos para el tratamiento de elementos tóxicos. Ya que tanto las obleas de silicio como el vidrio sufren ruptura durante el proceso de desmantelamiento no pueden ser reutilizadas. El EVA no puede ser recuperado durante el proceso por lo que no cumple ninguna técnica de gestión. El PVF es un material no reciclable y que también no puede ser recuperado de forma íntegra por lo que tampoco puede ser reutilizado, pero es un material no tóxico por lo que si cumple con los requisitos para ser procesado en un vertedero.

Para evaluar el beneficio al medio ambiente se determinó el volumen y masa que ocupa un panel solar fotovoltaico y se comparó con el material que se haya logrado recuperar.

Los paneles utilizados para realizar el desmantelamiento son más pequeños que los más utilizados. Para evaluar cuánto material se puede obtener de un panel solar de tamaño estándar se determinó, primero, cuánto material se obtuvo durante el desmantelamiento de la muestra tratada; se consiguió qué porcentaje representa cada componente del peso total de la muestra antes de separarlos. Luego, los porcentajes se utilizaron para determinar cuánto pesa cada componente de todo el panel solar.

A continuación, se muestra un ejemplo de las ecuaciones realizadas. Los resultados se encuentran en la tabla VI.

Para calcular el porcentaje de vidrio en la muestra se utilizó la siguiente ecuación.

$$\%_v = \frac{P_v}{P_t} = \frac{224 \text{ g}}{235.8 \text{ g}} = 95.00 \%$$

Donde P_v es el peso del vidrio luego del tratamiento térmico y ser separado, y P_t es el peso total de la muestra.

Para determinar el peso total utilizado de vidrio en el panel se realizó el siguiente cálculo.

$$PT_v = PT_t * \%_v = 2573 * 95 \% = 2444.4 \text{ g}$$

Donde PT_t es el peso de todo el conjunto de vidrio, obleas de silicio, y las barras colectoras. El proceso se realizó para todas las demás muestras.

Tabla VI. **Material recuperado**

| | Peso muestra (g) | Porcentaje | Peso completo (g) |
|-------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| Vidrio | 224 | 95.00 % | 2444.4 |
| Silicio | 7.9 | 3.35 % | 86.2 |
| Barras colectoras | 2.7 | 1.15 % | 29.5 |
| EVA | 1.2 | 0.50 % | 12.9 |
| Total | 235.8 | 100 % | 2573 |

Fuente: elaboración propia.

Para determinar cuánto material hay en un panel de tamaño estándar se comparó el peso del panel utilizado en este trabajo contra el peso de un panel de referencia. En este caso se utilizó el peso de un panel marca JINKO SOLAR, modelo Eagle PERC 72 de 340 a 360 W, que es comercializado en Guatemala. Según la ficha técnica el peso del panel es de 26.5 kg. Este dato puede encontrarse en el anexo.

Tabla VII. **Peso de material en panel JINKO**

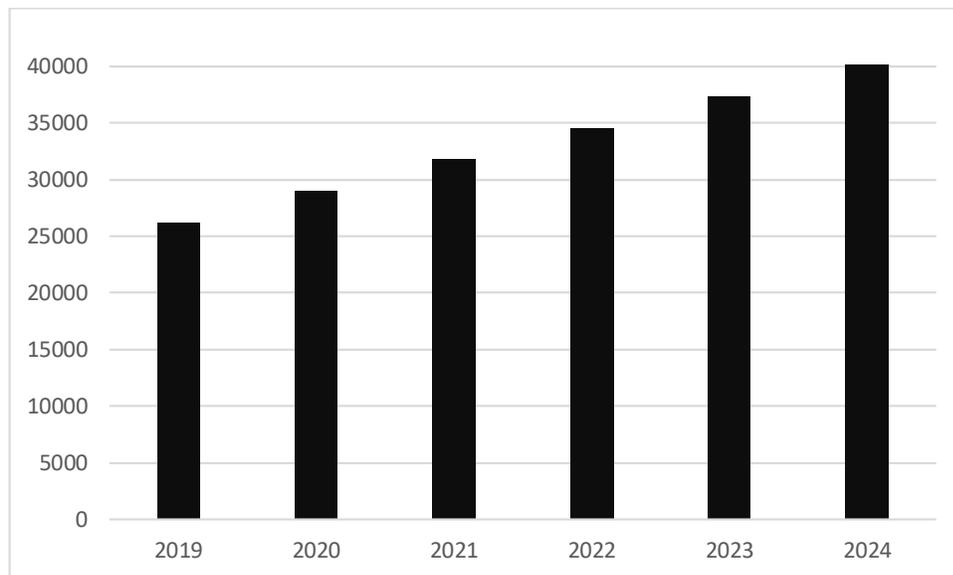
| | Peso muestra (g) | Porcentaje | Panel JINKO (g) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Aluminio | 479 | 14.7 % | 3897.5 |
| Vidrio | 2444 | 75.1 % | 19888.8 |
| Silicio | 86 | 2.6 % | 701.3 |
| Metal | 29 | 0.9 % | 239.7 |
| EVA | 13 | 0.4 % | 104.7 |
| PVF | 170 | 5.2 % | 1383.2 |
| Caja conexión | 35 | 1.1 % | 284.8 |
| Panel completo | 3257 | 100.0 % | 26500 |

Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS

Con los valores de los paneles importados en los últimos 6 años y con la ecuación del pronóstico de importaciones de la sección 2 de este trabajo, se realizó un pronóstico de la cantidad de paneles a ser importados a Guatemala hasta el año 2024.

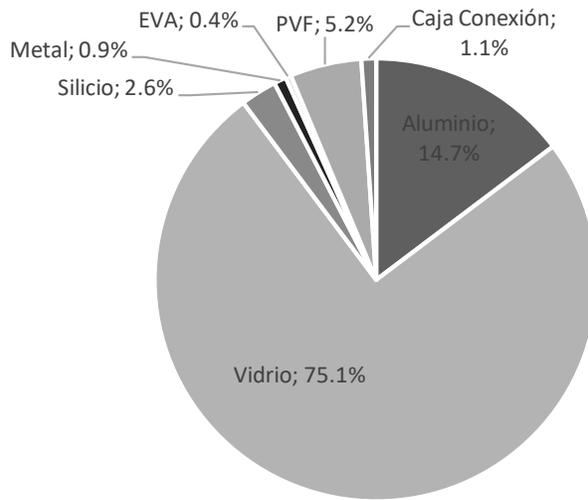
Figura 22. **Pronóstico de importaciones anuales**



Fuente: elaboración propia.

Después del proceso de separación del panel de 40 W y la medición de cada componente rescatado se estimó el porcentaje, en peso, de cada uno de los componentes.

Figura 23. **Porcentaje en peso de los componentes en un panel solar**



Fuente: elaboración propia.

Con los análisis FRX en las obleas de silicio, el vidrio y las barras colectoras, se muestran en la tabla VIII el porcentaje de cada componente encontrado.

Tabla VIII. **Porcentaje de elementos químicos**

| Componente | | Obleas Silicio | Vidrio | Barras Colectoras |
|-------------------|----|-----------------------|---------------|--------------------------|
| Silicio | Si | 97.30 % | 51.70 % | 4.75 % |
| Cobre | Cu | 0.0405 % | 0.0149 % | 65.30 % |
| Platino | Pt | 0.035 % | N/A | N/A |
| Rubidio | Rb | 0.0073 % | N/A | N/A |
| Calcio | Ca | 1.02 % | 7.09 % | 5.91 % |
| Plata | Ag | 1.43 % | N/A | N/A |
| Arsénico | As | 0.0647 % | 0.0044 % | 7.38 % |
| Kriptón | Kr | 0.0557 % | N/A | N/A |
| Estroncio | Sr | N/A | 0.013 % | 1.30 % |
| Estaño | Sn | N/A | N/A | 16.70 % |
| Antimonio | Sb | N/A | 4.06 % | N/A |
| Rubidio | Rb | N/A | 37.10 % | N/A |

Fuente: elaboración propia.

Según el resultado de elementos químicos encontrados en cada componente del panel solar, se realizó la matriz de la tabla IX, que indica si el material puede ser reutilizado, reciclado, desechado o debe ser procesado como un material tóxico.

Tabla IX. **Matriz de gestión de desechos de paneles**

| Componente | Reutilización | Reciclaje | Vertedero | Desecho tóxico |
|-------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Obleas de silicio | No | Sí | Sí | No |
| Vidrio | No | No | No | Sí |
| Barras colectoras | No | No | No | Sí |
| Marco de aluminio | Sí | Sí | Sí | No |
| Caja de conexión | Sí | No | Sí | No |
| EVA | No | No | No | No |
| PVF | No | No | Sí | No |

Fuente: elaboración propia.

Con el peso de cada componente obtenido del panel de muestra, se obtuvo el porcentaje en peso que este representa, valor que se usó para determinar la cantidad de material en un panel de tamaño estándar. De la cantidad de aluminio obtenido de un panel estándar y por el precio de venta de Q2.50 por lb (precio del 14 de junio de 2019) se puede obtener un total de Q21.50. En la sección 3.2 se detalla el proceso realizado para la obtención del material.

Del total de material recuperado por panel solar y la cantidad de paneles importados por año se puede determinar la cantidad de materia total obtenida anualmente. En la tabla X se muestra el total de masa obtenida solamente del año 2018.

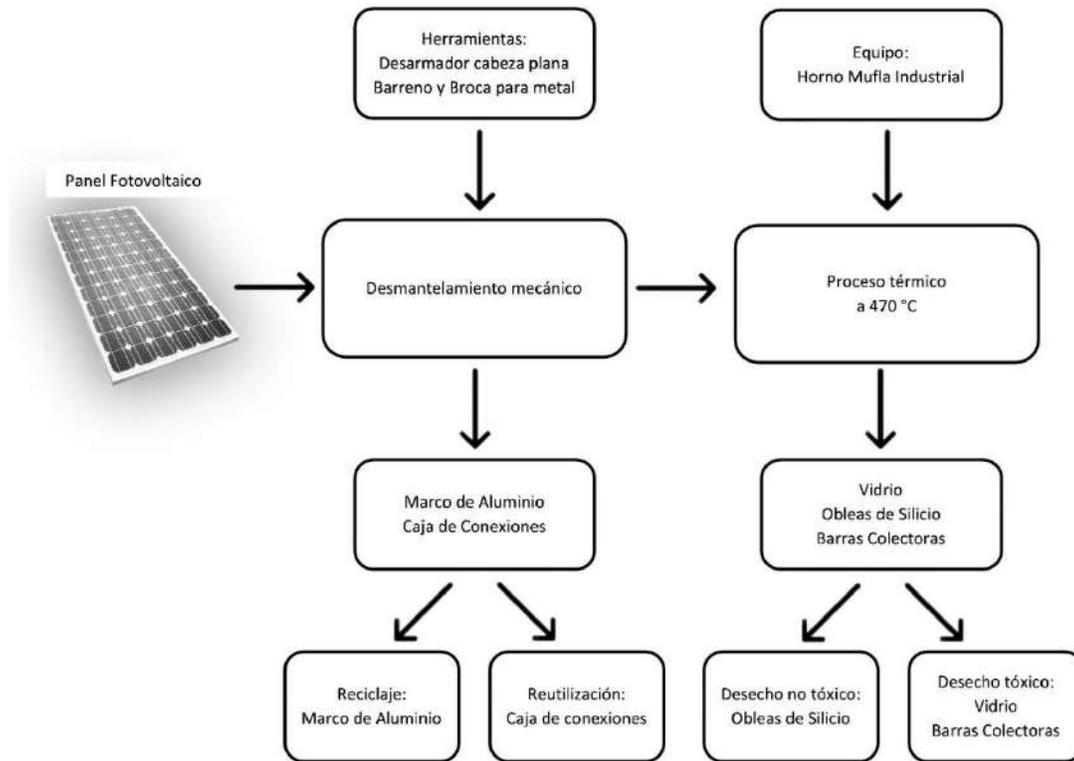
Tabla X. **Matriz de gestión de desechos de paneles**

| | Peso muestra (g) | Porcentaje | Panel estándar (g) | Total, paneles 2018 (kg) |
|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Aluminio | 479 | 14.7 % | 3,897.5 | 82,412 |
| Vidrio | 2,444 | 75.1 % | 19,888.8 | 420,549 |
| Silicio | 86 | 2.6 % | 701.3 | 14,830 |
| Barras colectoras | 29 | 0.9 % | 239.7 | 5,069 |
| EVA | 13 | 0.4 % | 104.7 | 2,213 |
| PVF | 170 | 5.2 % | 1,383.2 | 29,248 |
| Caja conexión | 35 | 1.1 % | 284.8 | 6,022 |
| Panel completo | 3,257 | 100.0 % | 26,500.0 | 560,343 |

Fuente: elaboración propia.

Para la separación de cada componente y su correcta gestión se debe seguir un proceso que se muestra en el siguiente esquema. El material no tóxico, obleas de silicio, puede ser desechado a un vertedero sin representar un peligro de contaminación; mientras que el material tóxico, el vidrio y las barras colectoras, deben ser almacenados de manera que se evite el contacto con el medio ambiente o reciclados con un proceso que recolecte los gases emanados durante el proceso.

Figura 24. Esquema de gestión integral de desechos



Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Actualmente, existe gran cantidad de paneles solares en Guatemala, aunado, al crecimiento de las importaciones esperadas para los siguientes años, significará que al cabo de unos cuantos, existirá gran volumen de materiales no biodegradables que deben ser desechados. El correcto procesamiento de los paneles permitirá reducir significativamente el volumen al reciclar y/o reutilizar sus partes.

Parte de los componentes de los paneles solares tienen elementos tóxicos; por lo tanto, es de suma importancia definir un proceso para el correcto procesamiento de los desechos y evitar así, una carga de desechos tóxicos para el suelo y de alto riesgo para la salud de los habitantes.

Debido a las altas temperaturas necesarias para separar el silicio del vidrio, 470 °C, este proceso no se puede realizar en un horno convencional, siendo necesario el uso de hornos especiales. Debido a que el vidrio mostró tener elementos tóxicos no se puede realizar un reciclaje convencional, pero se puede considerar una reutilización al lograr separarlo del silicio de forma completa. Para lo anterior, se necesita un horno de alta temperatura de tamaño conveniente que permita el ingreso del vidrio sin tener que dividirlo.

Se determinó el porcentaje del peso de los componentes principales de un panel solar fotovoltaico de silicio, a bien de precisar cuáles tienen un valor económico importante después de su vida útil. Al determinar que materiales tienen mayor porcentaje y el estado en que se recuperan, se establece la cantidad económica que se puede obtener por cada uno. Con el análisis FRX, se

establecieron los elementos que componen los paneles solares; además, reflejó la existencia de elementos tóxicos en parte de los componentes; por ende, se crea la necesidad de proponer un método alternativo de gestión para su desecho.

Para obtener el aluminio, material cien por ciento reciclable, solo se requiere de un proceso mecánico que consta de separar por medio de herramientas básicas los marcos de aluminio del resto del panel solar. Este proceso es económico y representa una ganancia monetaria. El vidrio, el principal material en los paneles solares, requiere de un proceso térmico más complejo que eleva su valor y al presentar componentes tóxicos su reciclaje requiere un proceso especial.

Las obleas de silicio presentaron un pequeño porcentaje de arsénico, pero es muy bajo para considerarse un peligro tóxico al momento de su reciclaje o desecho. Además, este pequeño porcentaje se debe a contaminación cruzada, ya que el principal componente de los paneles que contiene el arsénico, las barras colectoras, está unido a las obleas de silicio.

CONCLUSIONES

1. Para realizar el proceso de reciclaje o procesamiento de los materiales de los paneles solares, se deben separar siguiendo un procedimiento definido: primero, se debe realizar un proceso mecánico de separación de los marcos de aluminio y la caja de conexiones; segundo, deberá realizarse un proceso térmico a 470 °C para separar el silicio, vidrio y las barras colectoras, lo cual toma 1 hora y 15 minutos.
2. Los marcos de aluminio son el principal material reciclable de los paneles solares porque presentan bajo costo para su obtención y son 100 % reciclables, el precio del contenido de aluminio en un panel solar es de cerca de Q21.50. El silicio también es factible de reciclar, pero actualmente no existe en Guatemala una industria que pueda realizarlo. La caja de conexiones no puede ser reciclada; sin embargo, si es reutilizable si al retirarla del panel no sufre daño.
3. El vidrio mostró tener un 4.06 % de antimonio, por lo que deberá tratarse como material tóxico. Puede ser reciclado si la industria que lo realiza está preparada para el procesamiento de componentes tóxicos; de lo contrario, debe ser triturado, cuyo proceso no representa peligro de intoxicación para quien lo realice; posteriormente, debe ser entregado a empresas especializadas en manejo de desechos tóxicos. Las barras colectoras presentaron 7.38 % de arsénico, situación que las conduce también, a considerarse y, por ende, ser tratadas como material tóxico; estas representan un pequeño volumen de material que no requiere de un

tratamiento previo a entregarse a la empresa responsable del manejo de desechos tóxicos.

4. Los marcos de aluminio que son los más fáciles de ser reciclados o reutilizados pueden ser vendidos para su reciclaje a cualquier empresa dedicada a tal efecto o ser reutilizados en otros paneles que lo necesiten. Las cajas de conexiones son otros componentes que pueden utilizarse en otros paneles como repuesto, ya que al momento de su retiro es poco probable que sufran daño. Actualmente, no existen en el país industrias que reciclen silicio, siendo este, el inconveniente para reutilizar el material.
5. Con una correcta gestión de los desechos de cada panel fotovoltaico se evitará la contaminación del suelo por 810 g de material tóxico (antimonio y arsénico). Tan solo en el año 2018 se importaron 21,145 paneles, lo que equivale a 17,130 kg de material tóxico, lo que evita así la contaminación ambiental.

RECOMENDACIONES

1. Para reducir los tiempos y costos del reciclaje de los paneles solares se recomienda realizar este proceso a varios paneles a la vez para aprovechar las altas temperaturas del horno cuando termina el proceso de separación del primer panel, para iniciar el proceso del segundo panel.
2. El silicio tiene un gran uso en muchos campos de la industria, el costo de reciclarlo es más barato que el de extraerlo, siendo un incentivo para la creación de industrias que realicen el proceso de extraerlo de los paneles solares lo que les permitirá tener beneficios económicos.
3. El vidrio es un material con gran valor para la industria guatemalteca, pero se necesita de una empresa de reciclaje que tenga los protocolos adecuados para procesarlo, por contener material tóxico. Se recomienda a las empresas recicladores de vidrio implementar protocolos de seguridad que le permitan reciclar vidrio con materiales tóxicos.
4. En el estudio de antecedentes se encontró un estudio similar a este y en el panel solar que ese estudio evaluó no se encontraron materiales tóxicos, por lo que se recomienda realizar un análisis FRX del tipo de panel que se quiere reciclar para determinar si contiene materiales tóxicos.
5. Si se pretende recuperar el vidrio sin ser partido antes, es recomendable la fabricación de un horno especial que soporte temperaturas de 500 °C y que tenga el tamaño suficiente para ingresar el panel en su totalidad para evitar el

fraccionamiento del vidrio templado (cerca de 3 mm diámetro) al quererlo cortar.

6. Debido a que el reciclaje del vidrio como del silicio no es aún posible en Guatemala, se recomienda no separar estos componentes y utilizarlo como paredes y techos en la construcción de recintos con material reciclado.

REFERENCIAS

1. Aarre, M. (2018). *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film*. Estados Unidos de América. Recuperado de Energy Informative: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
2. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2016). *Resúmenes de Salud Pública - Aluminio (Aluminum)*. Estados Unidos de América. Recuperado de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs22.html
3. Andersen, M. (2003). *¿Es la Certificación Algo para Mí? Una Guía Práctica sobre por qué, cómo y con Quién Certificar Productos Agrícolas para la Exportación*. San José: Unidad Regional de Asistencia Técnica.
4. CNEE. (2017). *Resumen CNEE*. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/normas/docs/GDR/Resumen%20UAEE.pdf>
5. e-Waste Guatemala. (2009). *e-waste de Guatemala*. Recuperado de Quienes Somos: <http://www.ewastedeguatemala.org/index.php/quienes-somos>

6. Fundación del Agua. (2018). *Residuos electrónicos: qué son y qué hacer con ellos*. Recuperado el 3 de octubre de 2018, de Aquae Fundación: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/otros/residuos-electronicos-que-son-y-que-hacer-con-ellos/>
7. Gomez, L. (2017). *SunFields*. España. Recuperado el 26 de septiembre de 2018, de Tipos de paneles solares en el sector fotovoltaico: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/tipos/>
8. GreenMatch. (2017). *GreenMatch*. Recuperado de The Opportunities of Solar Panel Recycling: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>
9. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2011). Acetato de vinilo. Documentación Límites Exposición Profesional, 10.
10. Kim, M. R., Pampena, R., Goldsmidt, V., & Marcos, K. (s.f.). *Ciclo de Vida del Vidrio de los Paneles Fotovoltaicos*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica.
11. Lenntech. (2009). *Lenntech*. Recuperado de Silicio - Si: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm>
12. Mosquera, P. (2016). *Energías Renovables*. España. Recuperado de Reciclaje de paneles solares, una actividad de altísimo potencial económico: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/recilaje-de-paneles-solares-una-actividad-de-20160620>

13. Perpiñán, O. (2012). Energía solar fotovoltaica. España: Creative Commons.
14. Power From Sunlight. (2017). *What You Need to Know About Solar Cell Busbar: 0BB, 3BB or 5BB*. Recuperado de Power From Sunlight: <https://www.powerfromsunlight.com/need-know-solar-cell-busbar-0bb-3bb-5bb/>
15. Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente. (2004). *Directrices técnicas para el reciclado/regeneración ambientalmente racional de metales y compuestos metálicos (R4)*. Vernier: Secretariat of the Basel Convention.
16. Reciclados y Demoliciones San Juan. (2016). *Residuos sólidos tóxicos: Cómo identificarlos?*. Recuperado de <http://www.rdsanjuan.com/residuos-solidos-toxicos-como-identificarlos/>
17. Renovetec. (2018). *Paneles Fotovoltaicos: Concepto y tipos*. Recuperado el 26 de septiembre de 2018, de Energiza: <http://www.energiza.org/>
18. Rooij, D. (2011). *EVA (ethylene vinyl acetate) Film: composition and application*. China. Recuperado de Sinovoltaics: <http://sinovoltaics.com/learning-center/materials/ethylene-vinyl-acetate-eva-film-composition-and-application/>

19. Serrano, R. (2017). *Tipos de Paneles Fotovoltaicos*. Chile. Recuperado de Tritec: <http://www.tritec-intervento.cl/productostritec/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
20. Solar Energy Industries Association. (2018). *Solar Energy Industries*. Recuperado de Photovoltaic (Solar Electric): <https://www.seia.org>
21. Soluciones Integrales en Reciclaje, S.A. (2017). *Quienes somos*. Recuperado de http://www.solirsa.com/reciclaje_electronicos_costarica.php

APÉNDICES

Apéndice 1. Importaciones de paneles solares para el año 2013

| Fecha | Fracción arancelaria | Descripción | País | Cantidad Fracción | Unidad Medida |
|------------|----------------------|--|---------------|-------------------|---------------|
| 8/01/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR | UNITED STATES | 4 | PIEZAS |
| 15/01/2013 | 85023900 | PANEL SOLAR | MÉXICO D.F. | 2 | PIEZAS |
| 15/01/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR | CHINA | 1 | PIEZAS |
| 17/01/2013 | 85023900 | UN PANEL SOLAR | UNITED STATES | 1 | PIEZAS |
| 21/01/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR PARA BOMBA | CHINA | 8 | PIEZAS |
| 21/01/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR PARA BOMBA | CHINA | 9 | PIEZAS |
| 21/01/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR | CHINA | 1 | PIEZAS |
| 29/01/2013 | 85016100 | PANEL SOLAR CON CARGADOR | CHINA | 12 | PIEZAS |
| 29/01/2013 | 85016100 | PANEL SOLAR CON CARGADOR | CHINA | 12 | PIEZAS |
| 29/01/2013 | 85016100 | PANEL SOLAR CON CARGADOR | CHINA | 12 | PIEZAS |
| 5/02/2013 | 85469000 | PANEL SOLAR | UNITED STATES | 2 | PIEZAS |
| 5/02/2013 | 85414000 | SR-30 PANEL SOLAR 30W SOLAR PANEL 12V | UNITED STATES | 20 | PIEZAS |
| 6/02/2013 | 85371000 | PANEL SOLAR VARIADO MARCA VARIADA MODELO VARIADO | UNITED STATES | 1 | PIEZAS |
| 8/02/2013 | 85371000 | PANEL SOLAR VARIADO MARCA VARIADA MODELO VARIADO | UNITED STATES | 1 | PIEZAS |
| 11/02/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR | CHINA | 1 | PIEZAS |
| 18/02/2013 | 85414000 | PANEL SOLAR | UNITED STATES | 2 | PIEZAS |

Fuente: elaboración propia.

El apéndice 1 muestra los datos obtenidos de las importaciones. Para tener más datos de las importaciones del año 2013 al 2018, contactar al autor de este trabajo.

Apéndice 2. Mufla



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestras primera prueba en mufla



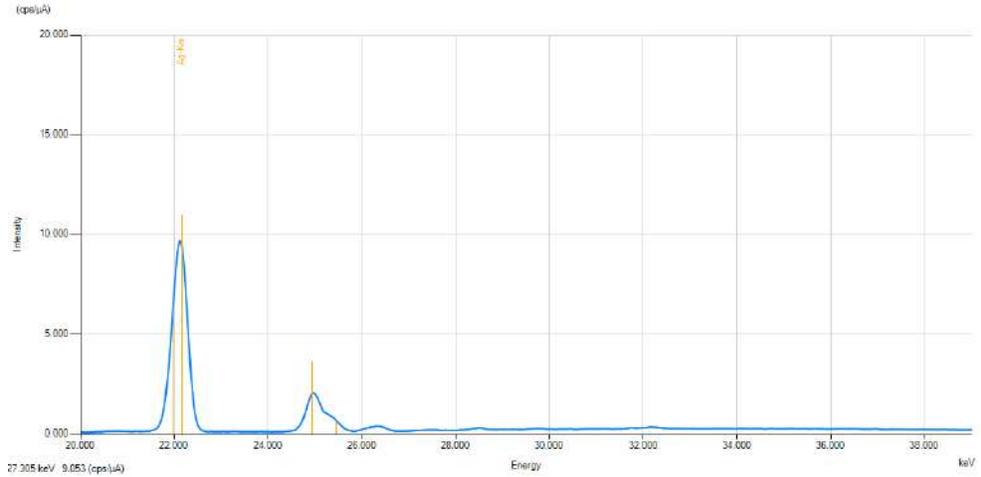
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Temperatura inicial y temperatura objetivo en mufla



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Análisis de rayos X en obleas de silicio pt. 3



Fuente: elaboración propia.

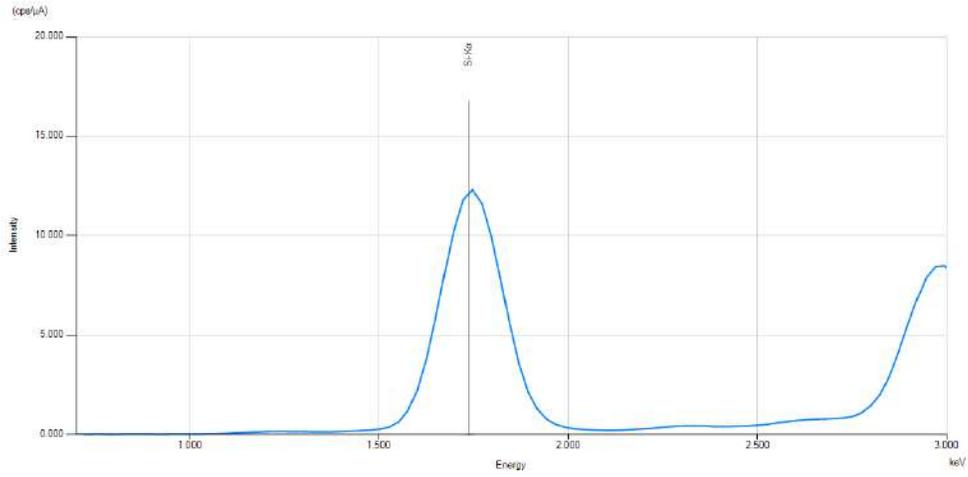
Apéndice 8. Porcentajes detectados en obleas de silicio

Type: FP Analysis
 Folder: <Common> Browse...
 File: Paneles solares_201909091022 Count: 1
 Date: 09/09/2019 10:22 a. m. Sample: panel Application: Paneles solares
 Components... Condition... Output... Calculate

| Component | Analyzed value | Unit | Statistics error | Detection limit | Quantitation limit |
|-----------|----------------|-------|------------------|-----------------|--------------------|
| Si | 97.3 | mass% | | | |
| Cu | 0.0405 | mass% | 0.0004 | 0.0001 | 0.0004 |
| Pd | ND | mass% | | | |
| Pt | 0.0346 | mass% | 0.0005 | 0.0002 | 0.0006 |
| Rb | 0.0073 | mass% | <0.0001 | <0.0001 | 0.0001 |
| Ca | 1.02 | mass% | 0.0180 | 0.0242 | 0.0726 |
| Ag | 1.43 | mass% | 0.0012 | 0.0024 | 0.0073 |
| As | 0.0647 | mass% | 0.0003 | <0.0001 | 0.0002 |
| Kr | 0.0557 | mass% | 0.0002 | <0.0001 | <0.0001 |

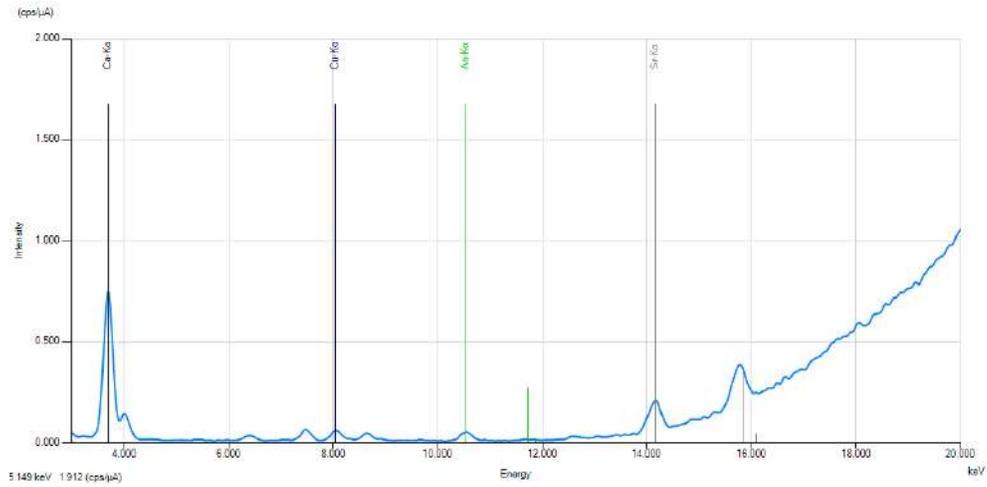
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Análisis de rayos X en vidrio



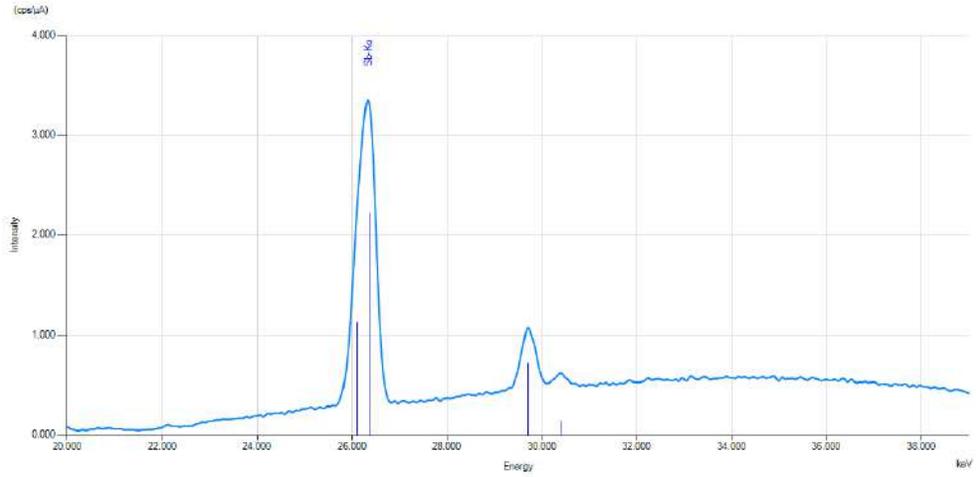
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Análisis de rayos X en vidrio pt. 2



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Análisis de rayos X en vidrio pt. 3



Fuente: elaboración propia.

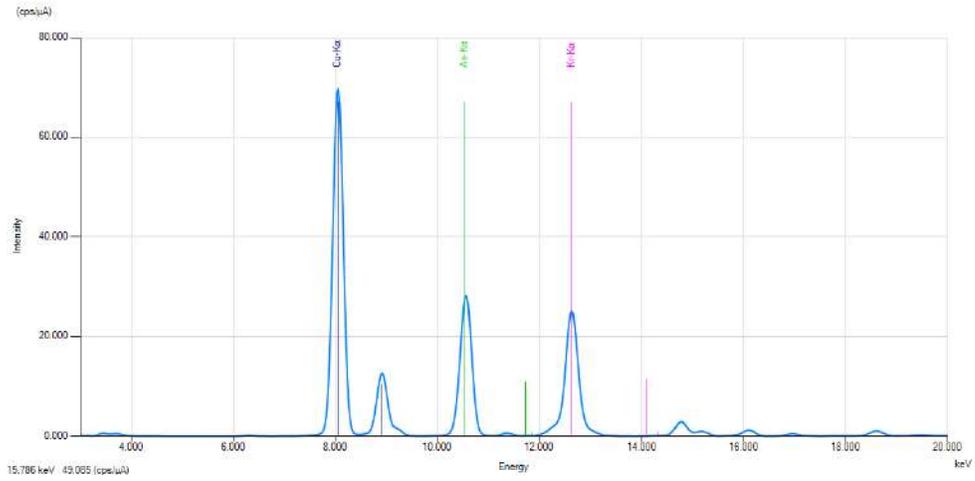
Apéndice 12. Porcentajes detectados en vidrio

Type: FP Analysis
Folder: <Common> Browse...
File: Paneles solares Count: 1
Date: 09/09/2019 10:16 a. m. Sample: vidrio Application: Paneles solares
Buttons: Components..., Condition..., Output..., Calculate

| Component | Analyzed value | Unit | Statistics error | Detection limit | Quantitation limit |
|-----------|----------------|-------|------------------|-----------------|--------------------|
| Si | 51.7 | mass% | | | |
| Cu | 0.0149 | mass% | 0.0004 | 0.0002 | 0.0006 |
| Ca | 7.09 | mass% | 0.0526 | 0.0583 | 0.175 |
| As | 0.0044 | mass% | 0.0001 | 0.0001 | 0.0003 |
| Sr | 0.0130 | mass% | 0.0002 | 0.0004 | 0.0013 |
| Sb | 4.06 | mass% | 0.0047 | 0.0092 | 0.0277 |
| Rb | 37.1 | mass% | 0.0840 | 0.0651 | 0.195 |

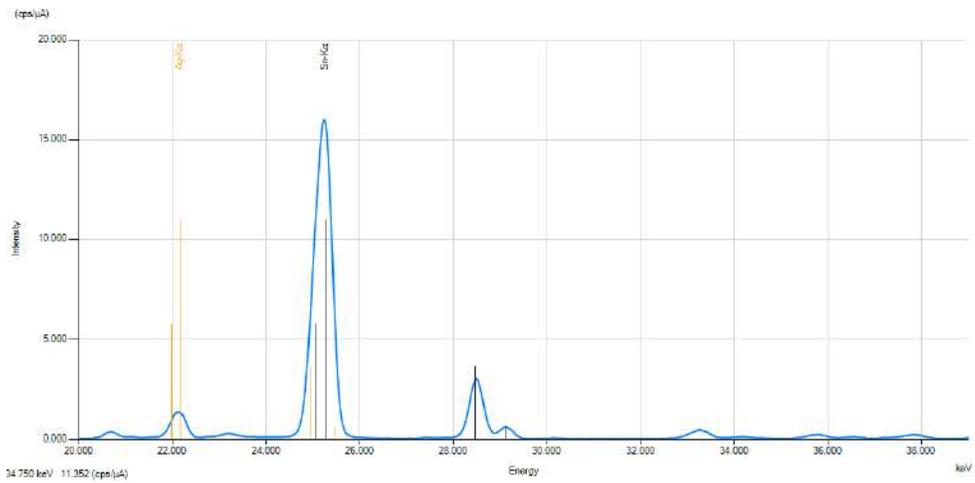
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Análisis de rayos X en barras colectoras



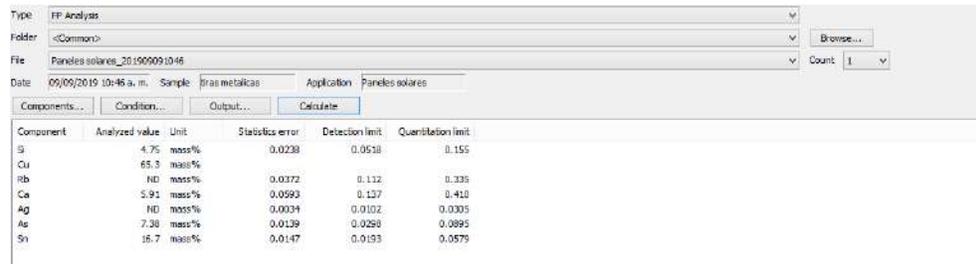
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Análisis de rayos X en barras colectoras pt. 2



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Porcentajes detectados en barras colectoras



| Component | Analyzed value | Unit | Statistics error | Detection limit | Quantitation limit |
|-----------|----------------|-------|------------------|-----------------|--------------------|
| S | 4.75 | mass% | 0.0238 | 0.0518 | 0.155 |
| Cu | 65.3 | mass% | | | |
| Rb | ND | mass% | 0.0372 | 0.112 | 0.335 |
| Ca | 5.91 | mass% | 0.0593 | 0.137 | 0.418 |
| Ag | ND | mass% | 0.0034 | 0.0102 | 0.0305 |
| As | 7.38 | mass% | 0.0139 | 0.0298 | 0.0895 |
| Sn | 16.7 | mass% | 0.0147 | 0.0193 | 0.0579 |

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica del panel solar

Eagle PERC 72

340-360 Watt

MONO CRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0+±0.3%

ISO9001:2009-ISO14001:2004-IEC61215-IEC61730 certified products.



PERC
(5BB)



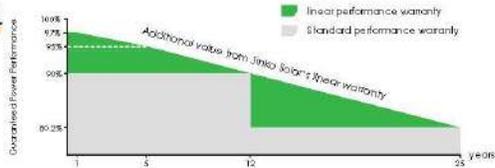


KEY FEATURES

- 
5 Busbar Solar Cell:
 5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.
- 
High Efficiency:
 Higher module conversion efficiency (up to 18.57%) benefit from Passivated Emitter Rear Contact (PERC) technology.
- 
PID RESISTANT:
 Limited power degradation of Eagle module, caused by PID effect is guaranteed under strict testing condition (85°C/85%RH/96hours) for mass production.
- 
Low-light Performance:
 Advanced glass and solar cell surface texturing allow for excellent performance in low-light environments.
- 
Severe Weather Resilience:
 Certified to withstand wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).
- 
Durability against extreme environmental conditions:
 High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty + 25 Year Linear Power Warranty



| Year | Standard Performance Warranty (%) | Linear Performance Warranty (%) |
|------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 97.5 | 97.5 |
| 10 | 97.5 | 97.5 |
| 25 | 80.25 | 80.25 |







Continuación del anexo 1.

Engineering Drawings

Front Side Back

I II III

Packaging Configuration

1 Two boxes = One pallet
26pcs/box, 52pcs/pallet, 624 pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (340W)

Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax

Mechanical Characteristics

| | |
|---------------|---|
| Cell Type | Mono-crystalline PERC 156x156mm (6 inch) |
| No. of cells | 72 (6x12) |
| Dimensions | 1956x992x40mm (77.01x39.05x1.57 inch) |
| Weight | 26.5 kg (58.4 lbs) |
| Front Glass | 4.0mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass |
| Frame | Anodized Aluminium Alloy |
| Junction Box | IP67 Rated |
| Output Cables | TUV 1x4.0mm ² , Length: 900mm or Customized Length |

SPECIFICATIONS

| Module Type | JKM340M-72 | | JKM345M-72 | | JKM350M-72 | | JKM355M-72 | | JKM360M-72 | |
|---|---------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT |
| Maximum Power (Pmax) | 340Wp | 254Wp | 345Wp | 258Wp | 350Wp | 262Wp | 355Wp | 266Wp | 360Wp | 270Wp |
| Maximum Power Voltage (Vmp) | 38.7V | 36.8V | 38.9V | 37.0V | 39.1V | 37.2V | 39.3V | 37.5V | 39.5V | 37.7V |
| Maximum Power Current (Imp) | 8.79A | 6.89A | 8.87A | 6.98A | 8.94A | 7.05A | 9.04A | 7.09A | 9.12A | 7.17A |
| Open-circuit Voltage (Voc) | 47.1V | 46.5V | 47.3V | 45.8V | 47.5V | 46.0V | 47.8V | 46.2V | 46.0V | 46.5V |
| Short-circuit Current (Isc) | 9.24A | 7.33A | 9.31A | 7.38A | 9.38A | 7.46A | 9.45A | 7.54A | 9.51A | 7.61A |
| Module Efficiency STC (%) | 17.52% | | 17.78% | | 18.01% | | 18.31% | | 18.57% | |
| Operating Temperature(°C) | -40°C→85°C | | | | | | | | | |
| Maximum system voltage | 1000VDC (IEC) | | | | | | | | | |
| Maximum series fuse rating | 15A | | | | | | | | | |
| Power tolerance | 0→+3% | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Pmax | -0.33%/°C | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Voc | -0.29%/°C | | | | | | | | | |
| Temperature coefficients of Isc | 0.048%/°C | | | | | | | | | |
| Nominal operating cell temperature (NOCT) | 46±2°C | | | | | | | | | |

*STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 📏 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 📏 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

Fuente: Jinko Solar (2018). *Eagel PERC 72 340-360 Watt.*