

UNIVERSIDAD DON BOSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**SITUACIÓN ACTUAL DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS DE PANELES
FOTOVOLTAICOS EN EL SALVADOR OCASIONADAS POR FALLAS
TEMPRANAS**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO(A) EN GESTIÓN ENERGÉTICA Y DISEÑO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

CARLOS EDUARDO CÁCERES ALVARADO

MARÍA MARCELA ORTIZ HERNÁNDEZ

RODRIGO ALEXANDER MONTANO AVALOS

ASESOR:

ISMAEL ANTONIO SÁNCHEZ

Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador Centroamérica

Noviembre de 2022

ÍNDICE DE CONTENIDO

ABREVIATURAS	2
RESUMEN	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Objetivos	7
1.1.1 General.....	7
1.1.2 Específicos	7
1.2 Justificación de la investigación.	8
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.	10
2.2 Elementos de los sistemas fotovoltaicos.....	14
2.3 Módulos fotovoltaicos.....	14
2.4. Componentes y características de los módulos fotovoltaicos.	17
2.5. Inversores.	22
2.6. Residuos generados por los módulos	24
2.7. Proyección de los residuos generados por módulos fotovoltaicos.	28
CAPÍTULO 3 FALLAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	31
3.1 Definición	31
3.2 Fallas tempranas.....	31
3.3 Fallas Regulares	35
3.4 Métodos para la determinación de fallas.	37
3.4.1 Análisis Termográfico.	37
3.4.2 Electroluminiscencia.....	38
3.4.3 Análisis del espectro visible.....	39

CAPÍTULO 4 MARCO LEGAL DE DISPOSICIÓN FINAL Y RECICLAJE DE MODULOS FOTOVOLTAICOS EN EL SALVADOR.	40
4.1 Antecedentes.	40
4.1.1 Proyección de ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares en El Salvador (USD).....	42
4.2 Procedimiento existente para el desarrollo u operación de actividades o generación de electricidad a partir de tecnología solar fotovoltaica.....	43
4.2.1 Categorización de proyectos destinados al aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica.....	44
4.2.2 Leyes aplicables para el uso de suelos para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica.....	49
4.3 Reglamentos o procedimientos legales usados para la disposición final de módulos fotovoltaicos.	50
4.3.1 Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos	50
4.3.2 Programa de manejo ambiental.....	51
4.4 Análisis de estado actual de aplicación de disposiciones de ley y normativo de generadores solares fotovoltaicos en El Salvador.	52
4.4.1 Estudio de aplicación del reciclaje o disposición final de módulos fotovoltaicos.	53
4.5 Políticas de Regulación, disposición final y reciclaje en otros países.	56
4.5.1 Antecedentes.....	56
4.5.2 Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)	56
4.5.3 Alemania.....	59
4.5.4 Reino Unido.....	62
4.5.5 Japón.....	64

4.5.6	Estados Unidos.....	66
4.5.7	China.	68
4.5.8	India.....	69
4.6	Análisis comparativo de regulaciones extranjeras.	70
4.6.2	Resumen de políticas de regulación en otros países.	72
4.6.3	Alcance de las regulaciones en otros países.....	75
4.7	Buenas prácticas para implementar en la regulación de El Salvador.	76
4.7.1	Propuesta desde la perspectiva de gestión.	76
4.7.2	Propuestas desde la perspectiva técnica.	80
4.7.3	Propuestas desde la perspectiva normativa	83
4.7.4	Opciones de cambio de regulación.....	85
CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE EMPRESAS DE RECICLAJE Y DISPOSICIÓN		
FINAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....		
5.1	Proceso de tratamiento de Deutsche Solar AG.....	89
5.2	El proceso de tratamiento de First Solar	90
5.3	PV Cycle (Ciclo FV).....	93
5.4	Situación actual del reciclaje fotovoltaico.	94
5.5	Futuros avances en el reciclaje de paneles fotovoltaicos.....	95
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS MÓDULOS		
FOVOLTAICOS.....		
6.1	Definición y alcance del análisis del ciclo de vida.	97
6.2	Ciclo de vida.....	97
6.2.1	Generalidades.	97
6.2.2	Canal de suministro Silicio Cristalino.....	99
6.2.3	Mezcla de mercados.....	100
6.2.4	Distribución y almacenamiento.....	101

6.2.5	Transporte.....	102
6.2.6	Factores principales de la logística fotovoltaica.....	103
6.2.7	Producción de producto.....	103
	Fuente: (Balenzategui, 2006).....	106
6.2.8	Fase de uso.....	109
6.2.9	Operación y Mantenimiento.....	109
6.3	Fin del ciclo de vida.....	113
6.3.1	Clasificación de los desechos los desechos fotovoltaicos.....	114
6.3.2	Tratamiento actual de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil.....	114
6.3.3	Ejemplo de tratamiento de módulos Silicio Cristalino (c-Si).....	116
6.4	Tendencias en la I+D tecnológica para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.....	117
6.5	Inventario del ciclo de vida.....	118
	CAPÍTULO 7 CASO DE ESTUDIO	120
7.1	Encuesta	120
7.2	Entrevistas.....	133
7.2.1	Entrevista Ing. José Luis Regalado	133
7.2.2	Entrevista Ing. Javier Medrano	139
	CAPÍTULO 8 ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO	145
8.1	Generalidades.....	145
8.2	Empresas de reciclaje local.....	145
8.3	Ejemplo de metodología de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.....	147
8.3.1	Cascada Eco Minerals.....	147
8.3.2	Alcances del servicio de A.S. Ingenieros.....	148

8.3.3	Certificado de destrucción y reciclaje.	149
8.3.4	Tarifas.....	150
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		151
Bibliografía		153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de célula, módulo, panel cadena y generador fotovoltaico en orden creciente.....	10
Figura 2 Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.....	11
Figura 3 Eficiencias de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos disponibles en el mercado.....	16
Figura 4 Estructura de los componentes que forman un módulo fotovoltaico	18
Figura 5 Curva I-V de un módulo fotovoltaico	19
Figura 6 Conexionado en serie o paralelo de paneles para obtener mayor tensión o corriente.....	21
Figura 7 Conectores MC4 macho y hembra, armados para su uso. Despiece de conectores y accesorios para conectar en serie y paralelo de varias filas o strings.....	22
Figura 8 Capacidad instalada de energía solar en El Salvador de 2013 a 2021... 29	
Figura 9 Tipos de fallas en paneles fotovoltaicos.....	32
Figura 10 Módulo con fractura.....	36
Figura 11 Proceso de generación de un Hot spot	37
Figura 12 Imagen de cámara termográfica con Drone	38
Figura 13 Imagen de detección de fallos mediante electroluminiscencia.....	38
Figura 14 Ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares de El Salvador . 43	
Figura 15 Volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.	71
Figura 16 Flujo de etapas del ciclo de vida de un panel fotovoltaico de Silicio Policristalino.	98
Figura 17 Cadena de suministro de producción de electricidad fotovoltaica basada en silicio.....	99
Figura 18 Cuotas de mercado en 2018 de las cuatro regiones del mundo en polisilicio, producción de obleas, fabricación de células y módulos de silicio cristalino, y módulos de silicio cristalino instalados, en capacidad de potencia MW	101

Figura 19 Etapas generales de la fabricación de módulos fotovoltaicos.	104
Figura 20 Corte de lingotes de obleas de Silicio.	105
Figura 21 Adición del dopante.	106
Figura 22 Diagrama de conexión de las células dentro del módulo fotovoltaico .	106
Figura 23 Imagen del proceso de fabricación de un módulo, en el que se puede apreciar la estructura del laminado.	107
Figura 24 Partes que conforman un módulo fotovoltaico.	108
Figura 25 Intersección de diodos de bloqueo en el conexionado del módulo.	108
Figura 26 Flujo general del tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil.	115
Figura 27 Tiempo de operación de plantas solares fotovoltaicas.	121
Figura 28 Marcas de fabricantes de módulos fotovoltaicos.	122
Figura 29 Potencias nominales de módulos fotovoltaicos.	123
Figura 30 Tipos de tecnología en módulos fotovoltaicos.	123
Figura 31 Tipos de estructuras de montaje de módulos fotovoltaicos.	124
Figura 32 Tipos de sistema de soporte de placas fotovoltaicas.	124
Figura 33 Porcentaje de plantas que poseen reporte de fallas en módulos fotovoltaicos.	125
Figura 34 Porcentaje de frecuencia con que se registran fallas en módulos fotovoltaicos en plantas fotovoltaicas.	125
Figura 35 Tipos de fallas en módulos fotovoltaicos que se han presentado con mayor frecuencia en las plantas fotovoltaicas.	126
Figura 36 Alcance de las garantías de los módulos fotovoltaicos con respecto a la disposición final.	126
Figura 37 Conceptualización de la disposición final de módulos fotovoltaicos de los administradores de plantas fotovoltaicas.	127
Figura 38 Empresas que cuentan con procesos de manejo de residuos de módulos fotovoltaicos.	127
Figura 39 Empresas que poseen espacio asignado para almacenamientos de módulos fotovoltaicos.	128

Figura 40 Condiciones físicas del espacio destinado para almacenamiento de módulos fotovoltaicos en plantas fotovoltaicas.....	128
Figura 41 Empresas que poseen procedimientos de disposición final de módulos fotovoltaicos.....	129
Figura 42 Conocimiento sobre empresas locales que brinden el servicio de disposición final de módulos fotovoltaicos.....	129
Figura 43 Conocimiento sobre empresas extranjeras que brinden el servicio de disposición final de módulos fotovoltaicos.....	130
Figura 44 Conceptualización del ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos.....	130
Figura 45 La incidencia de la aplicación de leyes sobre disposición final de módulos fotovoltaica.....	131
Figura 46 Consulta de la importancia del tratamiento final de módulos fotovoltaicos	131
Figura 47 Rangos de precios considerados adecuados para la disposición final de paneles fotovoltaicos	132
Figura 48 Estructura de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.....	147
Figura 49 Certificado de destrucción y reciclaje de paneles fotovoltaicos emitido por Cascada Eco Minerals.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en los paneles de silicio.....	25
Tabla 2 Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en paneles de película delgada.....	26
Tabla 3 Proyección de ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares en ES (USD).....	42
Tabla 4 Categorización para actividades, obras o proyectos destinados a la generación de energía eléctrica a base del aprovechamiento de la energía solar.....	46
Tabla 5 Resumen de proyectos muestreados.....	53
Tabla 6 Medidas de mitigación de residuos de proyectos en sus diferentes etapas.....	54
Tabla 7 Objetivos anuales de recolección y recuperación (% en masa) en virtud de la Directiva WEEE.....	58
Tabla 8 Parámetros alemanes para el cálculo de garantía de módulos FV.....	60
Tabla 9 Volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil (millones de toneladas).....	70
Tabla 10 Resumen de políticas de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en otros países.....	73
Tabla 11 Categorización de enfoques de países.....	75
Tabla 12 Componentes del panel fotovoltaico de c-Si.....	81
Tabla 13 Operaciones básicas de tratamiento y reciclaje de paneles fotovoltaicos.....	87
Tabla 14 Algunas actividades de reciclaje conocidas.....	88
Tabla 15 Actividad típica de reciclaje y reutilización.....	90
Tabla 16 Cuota de mercado en MW de potencia.....	100
Tabla 17 Cambios en los objetivos y motivaciones para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.....	117
Tabla 18 Nombre de las plantas fotovoltaicas incluidas en el estudio.....	120
Tabla 19 Ubicación de plantas fotovoltaicas incluidas en el estudio.....	121
Tabla 20 Capacidad nominal de plantas fotovoltaicas.....	122

Tabla 21 Directorio de empresas locales recicladoras y recuperadoras autorizadas por el MARN.	146
Tabla 22 Precio por servicio de reciclaje de paneles	150

ABREVIATURAS

IRENA:	International Renewable Energy Agency
FV:	Fotovoltaico
MW:	Megavatio
CNE:	Consejo Nacional de Energía
GW:	Gigavatio
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
IEA-PVPS:	International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems
kWp:	kilowatt peak
Wp:	Vatios peak
kW:	kilowatt
MPPT:	Maximum Power Point Tracker
IL:	Corriente de iluminación
Voc:	Tensión de circuito abierto. (Del inglés, Open Circuit Voltage (Voc)).
Isc:	Corriente de cortocircuito. (Del inglés, Short Circuit Intensity (Isc))
Imp:	Corriente del punto de máxima potencia (Del inglés, Maximum Power Intensity (Imp))
Vmp:	Tensión del punto de máxima potencia (Del inglés, Voltage of Maximum Power).
Pmax:	Máxima potencia que entrega el panel
Vm:	Tensión máxima
Im:	Intensidad máxima
FF:	Factor de Forma
W/m²:	vatios por metro cuadrado
STC:	Standard Test Condition
AM:	Air Mass
MC4:	MC son las siglas del fabricante "Multi-Contact", el número indica el diámetro del pin de contacto
UV:	Ultra Violeta
Hz:	Hercio o Hertz
DC:	Direct Current
AC:	Alternating Current
W:	Watt
RAEE:	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
EVA:	Etil-Vinil-Acetato
CIGS:	Copper indium gallium selenide
CIS:	Copper indium gallium (di) selenide

MINDS:	Manejo Integral de los Desechos Sólidos
USD:	Dólar Estadounidense
TDR:	Términos de Referencia
PMA:	Programas de Manejo Ambiental
UE:	Unión Europea
WEEE:	Waste Electrical and Electronic Equipment
Stiftung EAR:	Stiftung EAR stiftung elektro-altgeräte register
B2B:	Business-to-Business
B2C:	Business to Consumer
BIPV:	Build Integrate Photovoltaics
METI:	Ministerio de Economía, Comercio e Industria
MOE:	Ministerio del Medio Ambiente
IEE:	The Institution for Electrical Engineers of the National Academy of Sciences, China.
JNNSM:	Misión Solar Nacional Jawaharlal Nehru
EVA:	Etilvinilo de Acetato
IEA-PVPS:	International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme
EE. UU:	Estados Unidos de America
LCD:	Liquid-Crystal Display
CdTe:	Teluro de cadmio
CU-PV:	Energy Research Center of the Netherlands and PV CYCLE
LCA:	Life Cycle Analysis
mg/l:	Miligramos por litro
CEM:	Cascada Eco Minerals
APAC:	Asia y Pacifico
LCI:	Life Cycle Inventories
W/m²:	Vatios por Metro Cuadrado

RESUMEN

La tecnología fotovoltaica es una de las prometedoras para mejorar la seguridad energética y mitigar el cambio climático. El mercado fotovoltaico está creciendo rápidamente y se espera una mayor expansión del mercado en el mundo. Además de sus efectos positivos en la seguridad energética y cambio climático, la tecnología fotovoltaica se encuentra entre las más amigables con el medio ambiente, sobre todo si se evalúa desde el punto de vista del ciclo de vida, incluida la gestión del fin de vida o disposición final de los desechos.

Esto significa que la gestión adecuada del fin de la vida del panel fotovoltaico es indispensable para las tecnologías limpias. En general, la gestión sostenible de los residuos ofrece oportunidades conocidas como las 3R: reducir, reutilizar y reciclar. Cuando un producto no puede repararse o reutilizarse, el reciclaje es la siguiente opción preferible antes de eliminarlo como residuo. En vista del gran volumen de residuos de módulos fotovoltaicos, y para mantener la categoría de tecnología de energía limpia, el reciclaje de módulos fotovoltaicos se ha convertido en un tema de gran importancia, y los gobiernos, las organizaciones y las empresas han llevado a cabo varios debates y actividades. (Los debates sobre el tema de la reutilización de los módulos fotovoltaicos se consideran menos maduros).

Por lo anterior mencionado, se vuelve importante investigar el estado actual en El Salvador de la problemática de la disposición final de los desechos de paneles fotovoltaicos producto de fallas tempranas.

En el primer capítulo se realiza una reseña del problema que existe en el país con respecto a la disposición final de los módulos dañados. En este capítulo se plantea la justificación de la investigación, el objetivo general y el específico de este estudio.

En el segundo capítulo se realiza una descripción general de la investigación. En ella se describe de manera exhaustiva los componentes de los paneles solares desde el tipo hasta su funcionamiento. Así como también se hace énfasis en los tipos de desechos que los paneles generan según el tipo de material del que están contruidos.

En el tercer capítulo tres se presenta el concepto de fallas tempranas que afectan a los paneles fotovoltaicos, así como las principales fallas y las causas que las producen. Pero también es importante conocer los métodos o tecnologías disponibles en el mercado para la determinación fallas en los paneles.

Siguiendo con el capítulo cuatro se da contexto del estado actual de la regulación usada en El Salvador para dar disposición final o reciclaje a los paneles fotovoltaicos. El capítulo inicia con la descripción de las leyes vigentes en el país utilizadas para el desarrollo de proyectos con tecnología fotovoltaica para la generación de energía. Por último, se emiten recomendaciones para la modificación en la regulación o leyes teniendo como insumo las buenas prácticas de otros países con experiencia en la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

En el capítulo cinco se evalúan las empresas de reciclaje y disposición final de módulos fotovoltaicos. Se busca conocer cuáles son las empresas más representativas en el extranjero, así como sus métodos de reciclaje o disposición final a los materiales que componen a un panel fotovoltaico.

En el capítulo seis aborda el análisis del ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos. Conocer el ciclo de vida permite medir la sostenibilidad ambiental y de los recursos. El ciclo de vida tiene distintas etapas que van desde el canal de suministro, producción uso, reciclaje y recuperación de materiales. En este capítulo se describe brevemente en que consiste cada etapa del ciclo de vida del módulo fotovoltaico.

El capítulo siete tiene como objetivo que el lector conozca el manejo de los residuos utilizado por los generadores de energía con tecnología fotovoltaica de El Salvador. Para obtener la información necesaria se utilizaron las herramientas de la entrevista (2) y encuestas (11). A partir de los resultados se emitieron conclusiones y se obtuvo una perspectiva más aterrizada que servicio como insumo para dar recomendaciones en un posterior capítulo de este documento.

El capítulo ocho se describe un breve análisis técnico y financiero para que cualquier generador de energía de tecnología fotovoltaica conozca a través de un ejemplo de una empresa que brinda el servicio de disposición final de residuos de paneles

fotovoltaicos los pasos a seguir, costos y el alcance del servicio que esta empresa brinda.

Por último, en el capítulo nueve se dan recomendaciones y conclusiones a partir del resultado de la investigación de los capítulos anteriores que buscan dar ideas al lector en el caso de las recomendaciones para vencer las distintas barreras que existen en El Salvador para dar una adecuada disposición final o reciclaje a los residuos de paneles fotovoltaicos. Por otro lado, las conclusiones dan respuesta a los objetivos planteados en un inicio en esta investigación.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático, los efectos de la contaminación atmosférica, la seguridad energética y el acceso a la energía, junto con la volatilidad de los precios de la energía en las últimas décadas, han llevado a la necesidad de producir utilizar opciones tecnológicas alternativas y bajas en carbono como las energías renovables. La energía solar fotovoltaica ha sido una de las tecnologías renovables pioneras durante la última década. La capacidad total instalada de energía solar FV alcanzó los 480 GW a nivel mundial a finales de 2018, lo que representa la segunda mayor fuente de electricidad renovable después de la eólica. El año pasado la energía solar fotovoltaica volvió a dominar el total de adiciones de capacidad renovable y energía, añadiendo el doble de capacidad que la eólica y más que todos los combustibles fósiles y la nuclear juntos, las adiciones de energía solar fotovoltaica alcanzaron alrededor de 94 GW (IRENA, 2019)

En cuanto al contexto nacional, el país ha acompañado las energías renovables sobre todo la solar fotovoltaica muestra de esto es que entre 2013 y 2018 se han incluido a la matriz energética 94 MW en proyectos fotovoltaicos en el mercado mayorista y aproximadamente 121.8 MW en proyectos de energía eléctrica. Se prevé que para 2023 se incorporen 369.9 MW y se toma en cuenta los proyectos que el CNE prospecta que están en proceso de aprobación de permisos medio ambiental, proyectos con alto potencial de ejecución por intereses de inversores se puede estimar que para 2023 es altamente probable que 617.3 MW se añadan a la matriz energética (CNE, 2018).

En ese sentido, y con el auge de proyectos de tecnología solar fotovoltaica en El Salvador, es importante contemplar en el corto y mediano plazo el tratamiento o gestión de residuos específicamente de paneles fotovoltaicos. Un estudio reciente ha hecho una aproximación de la cantidad de residuos generados y se tiene que para 2030 se llegará a 165 toneladas y para 2040 llegará a 4,223 toneladas y en 2050 alcanzará 19,904 toneladas asumiendo que la mayoría de los paneles finalizaran su vida útil y que las fallas son elevadas. En el escenario de falla temprana se dice que para 2025 se tendrán 612 toneladas de residuos únicamente

de paneles fotovoltaicos y esta cantidad aumentará en los años subsiguientes, 2,391 toneladas en 2030 y 9,717 toneladas para 2040 (Campos, Choto, & Perdomo, 2020). En esta tesis se realiza una investigación que trata de conocer el panorama actual de la gestión de residuos (reciclaje o disposición final) de paneles fotovoltaicos en El Salvador, así también, las causas que producen estos residuos y la regulación existente en el país aplicable a este tipo de desechos.

1.1 Objetivos de la investigación.

1.1.1 General

Realizar un estudio para identificar cual es el estado actual del manejo de desechos de paneles fotovoltaicos provocados por fallas tempranas en El Salvador y, además, conocer cuáles son las guías de gestión, marco legal regulatorio y tecnologías de aplicación existentes con el fin de identificar oportunidades de mejora en la gestión de los residuos y así ofrecer recomendaciones y lineamientos técnicos que puedan ser aplicados en la gestión de estos residuos.

1.1.2 Específicos

- Investigar cual es la estrategia utilizada en países, usuarios y/o productores de la tecnología de sistemas fotovoltaicos para la disposición final de módulos que vean limitada su capacidad de producir electricidad o presenten fallas de funcionamiento.
- Investigar cuales son las principales empresas certificadas y no certificadas nacionales e internacionales por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador para brindar los servicios de disposición final a los residuos o desechos de paneles fotovoltaicos y posteriormente obtener de las distintas empresas información para evaluar económica y técnicamente sus servicios.
- Conocer cuál es la perspectiva actual y futura de los generadores fotovoltaicos sobre la disposición final de desechos de paneles producto de fallas tempranas y así evaluar el estado actual y futuro del compromiso y conciencia ambiental, dificultades y requerimientos necesarios para llevar a cabo la gestión de estos residuos.

- Realizar un estudio de las tecnologías existentes en el mundo que sirven para darle disposición final a los desechos a los paneles fotovoltaicos provocados por fallas tempranas para posteriormente identificar y evaluar técnicamente si estas tecnologías pueden ser implementadas en El Salvador.
- Investigar cuál es el marco regulatorio aplicado en otros países para darle disposición final a los desechos de paneles fotovoltaicos con el fin de evaluar si posible homologar en El Salvador, características técnicas o económicas de las regulaciones existentes.

1.2 Justificación de la investigación.

En El Salvador existe un desarrollo acelerado de las energías renovables por lo que se prevé que para 2023 se añadan 617.3 MW de potencia instalada de sistemas de generación solar fotovoltaica a la matriz energética. Este crecimiento debe de ir acompañado y en paralelo de una adecuada gestión ambiental de los residuos, específicamente de los provocados por fallas tempranas en los paneles que según estadísticas ocurren en los primeros 10 años de vida del panel con una probabilidad del 3% por causas como mal manejo en el transporte e instalación y otros problemas técnicos (IRENA & IEA-PVPS, 2016). Se estima que en el escenario de falla temprana se dice que para 2025 se tendrán 612 toneladas de residuos únicamente de paneles fotovoltaicos y esta cantidad aumentará en los años subsiguientes, 2,391 toneladas en 2030 y 9,717 toneladas para 2040 (MARN, 2017).

Lo anterior mencionado, evidencia que el problema debe de ser abordado de manera integral para que el impacto en el medio ambiente sea reducido o nulo. Para lograr este objetivo es muy importante identificar los puntos de mejora en el marco regulatorio nacional y homologar características de regulaciones internacionales que aporten o fortalezcan la normativa existente, así también, se busca el compromiso de los distintos entes gubernamentales y privados interesados y responsables del adecuado manejo de los desechos.

Se pretende con esta investigación, identificar el panorama o estado actual de la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos producto de fallas tempranas desde el punto de vista regulatorio y de los generadores de energía y posteriormente, con

estos insumos elaborar propuestas y recomendaciones de mejora en la gestión de estos residuos. Como parte del manejo de los desechos está el apartado técnico de la disposición final, para esto es necesario los servicios de empresas que tengan las tecnologías sirvan para dar disposición final a los desechos y además sean adecuadas y viables para la realidad del país. Esta evaluación se realizará desde un punto de vista técnico y económico desde la perspectiva del generador.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos que su objetivo principal es aprovechar la energía solar y convertirla en energía eléctrica maximizando la producción de esta energía eléctrica que será inyectada a la red. El funcionamiento de un sistema fotovoltaico se basa en que los módulos solares captan la energía solar por medio de las celdas fotovoltaicas que los conforman, estos módulos están interconectados por medio de un arreglo de cadenas (strings) y se conectan a las string boxes, como se observa en la figura 1. Luego las string boxes se interconectan a los inversores los cuales son los equipos encargados de transformar la corriente directa proveniente del campo solar en corriente alterna. Los inversores están interconectados a la subestación del campo fotovoltaico y esta interconectada a la subestación de la red donde inyectarán lo generado en el campo.

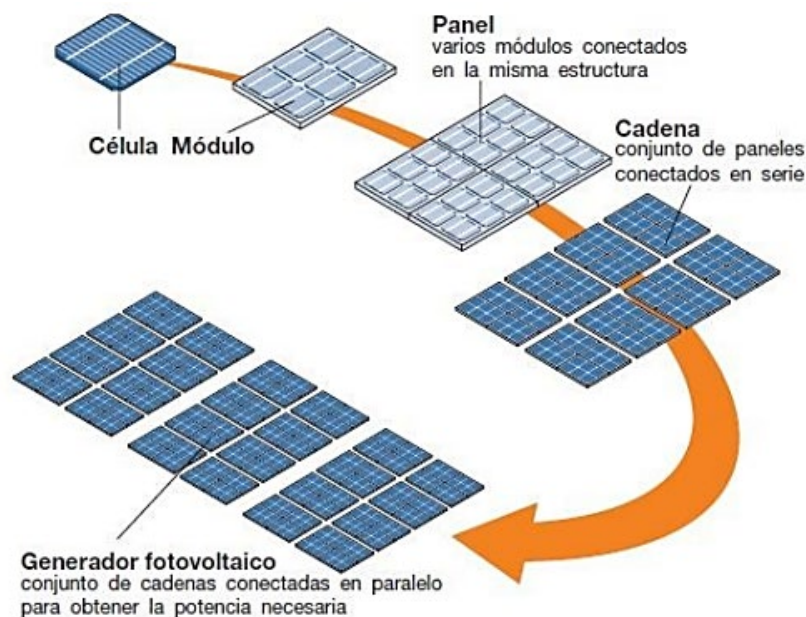


Figura 1 Clasificación de célula, módulo, panel cadena y generador fotovoltaico en orden creciente.

Fuente: (Díaz & Carmona, 2018)

Las principales aplicaciones de estos sistemas son para:

- Autoconsumo
- Venta de energía a la red

Los sistemas de auto consumo son aquellos que se encuentran instalados en techos de viviendas, edificios comerciales, estacionamientos y naves industriales con el fin de generar la energía eléctrica necesaria para alimentar ya sean luminarias o equipos diversos.

La potencia nominal de las instalaciones en viviendas unifamiliares o edificios en general está relacionada con la superficie útil disponible para la instalación del generador fotovoltaico, aproximadamente de 8 a 10 m² por kWp en función del rendimiento del generador FV. La potencia típica de la mayor parte de las instalaciones se sitúa en torno a los 5 kWp en viviendas unifamiliares y hasta 100 kWp en otras instalaciones en edificios e integración urbana. La conexión a red de este tipo de instalaciones se puede realizar directamente a la red de baja tensión en modo monofásico hasta 5 kW y en trifásico para el resto.

Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos conectado a red o de tipo de conexión de red, funcionan por medio de una cadena de módulos fotovoltaicos conectados en serie o en paralelo los cuales generan electricidad en corriente continua, esta se transforma por medio de uno o varios inversores para conexión de red en corriente alterna y se inyecta en paralelo con la red pública la generación lograda. Los sistemas solares fotovoltaicos conectados a red permiten a los usuarios cogenerar electricidad o inyectar en paralelo la energía, ya sea para autoconsumo o para el despacho al sistema interconectado.

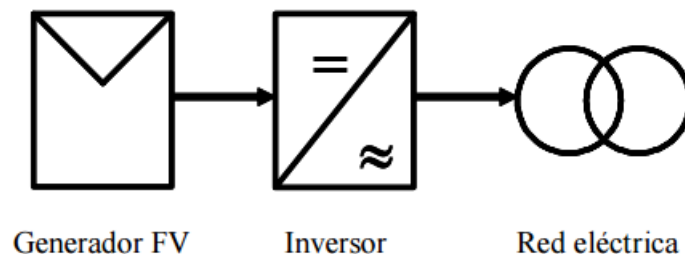


Figura 2 Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

FUENTE: (Navnotf, y otros, 2019)

Otro tipo de instalaciones fotovoltaicas de conexión a red son las centrales FV de generación eléctrica, con potencias nominales superiores a los 100 kWp, que suelen tener de una conexión a la red eléctrica en media o alta tensión, disponiendo de un centro de transformación en el que se eleva la tensión de salida de los inversores fotovoltaicos adecuándola a la tensión y frecuencia de la línea eléctrica.

El número de unidades en estos arreglos dependerá de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. La tensión eléctrica de salida del arreglo, que corresponde a la tensión de operación del inversor, se obtiene mediante la conexión en serie de un número determinado de paneles solares fotovoltaicos; y la potencia, a través de la conexión paralelo de dichas series. La potencia nominal de los módulos o paneles solares fotovoltaicos, normalmente está entre los 200 y 450 Wp. El material comúnmente usado en la fabricación de los módulos o paneles fotovoltaicos es el silicio; la eficiencia típica de estos módulos en condiciones estándar de irradiancia y temperatura (i.e., 1,000 W/m², Temperatura de la celda 25°C, AM1.5) se encuentra entre 14 y 22% para silicio monocristalino y silicio policristalino; y entre 5 y 7 % para los de silicio amorfo. (Renova Energía, 2013)

El acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por el arreglo fotovoltaico es indispensable para la conexión de éste a la red eléctrica convencional, se realiza mediante uno o varios inversores de tipo conexión de red, que convierte la corriente directa producida por el generador fotovoltaico a corriente alterna, en fase y a la frecuencia de la red para una conexión segura y confiable al sistema interconectado. La eficiencia de los inversores es generalmente mayor a 90% cuando éstos operan arriba del 10% de su potencia nominal. (Renova energía, 2021)

Para extraer siempre la máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico, el inversor incorpora entre sus funciones uno o varios elementos de control que sigue permanentemente el punto de máxima potencia del arreglo o MPPT, mediante un ajuste continuo de la impedancia de la carga.

Las compañías generadoras de electricidad pueden construir centrales FV en un tiempo mucho menor que las centrales convencionales debido a la facilidad de

instalación y conexión del generador FV. Las centrales FV, además de generar energía eléctrica, también pueden ser utilizadas para laminar los picos de demanda de consumo eléctrico que normalmente ocurren simultáneamente con los picos de generación FV, al mediodía. En otros pueden ser utilizadas para mejora de la calidad de la red en redes locales muy alejadas de los puntos de generación o incluso para el control voluntario de generación de energía reactiva. (Miguel, 2001).

Por lo tanto, el concepto de sistemas fotovoltaicos conectados a red es compatible con un amplio margen de aplicaciones, las cuales pueden ir desde centrales de centenares de megawatts hasta pequeños sistemas de unos cuantos kilowatts. El carácter propiamente modular de la tecnología fotovoltaica permite, al contrario que en la mayoría de las fuentes de energía convencionales, un costo unitario relativamente independiente del tamaño de la instalación; por ello los pequeños sistemas presentan un gran interés (producción de energía descentralizada u autosuficiencia del usuario o consumidor).

En términos generales, los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de las características y condiciones operativas de red de distribución, así como de la localización de éstos dentro de la misma. Los beneficios potenciales más importantes son:

- Modulación de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador.
- Alivio térmico a equipos de distribución, es decir, diversificación de la matriz energética, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar su capacidad o reemplazo.
- Disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- Soporte de tensión en alimentadores de distribución.
- Compensación de potencia reactiva en el alimentador.

En relación con los aspectos de seguridad y de calidad de la energía producida, las compañías suministradoras del servicio eléctrico requieren de los fabricantes y usuarios de estos equipos el cumplimiento de normas y disposiciones aplicables que garanticen que la instalación y operación del inversor, y del sistema fotovoltaico en su conjunto, sea segura y no afecte adversamente la calidad de la energía.

2.2 Elementos de los sistemas fotovoltaicos.

Los componentes básicos de una instalación fotovoltaica conectada a la red son:

- Módulos solares
- Inversores o micro inversores (dependiendo del tamaño del sistema)
- Interconexión eléctrica
- Medidor bidireccional (encargado de medir la inyección solar y de la red eléctrica)

2.3 Módulos fotovoltaicos.

Como se mencionó anteriormente, módulos solares forman una parte fundamental de los sistemas fotovoltaicos, ya que se encargan de captar la energía solar. Para garantizar la correcta inclinación y orientación con respecto a la luz solar, los módulos se colocan en estructuras de soporte específicas. Dos terminales de salida en cada módulo recogen y transfieren la corriente generada a los sistemas de gestión del parque solar.

Parámetros fundamentales del módulo solar:

- Corriente de iluminación (IL): La corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- Corriente de oscuridad: Es debida a la recombinación de los pares de electrón hueco que se produce en el interior del semiconductor.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): La máxima tensión que se obtiene en los extremos del módulo solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}) máximo valor de corriente que puede circular por el módulo solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitadas.

Cuando el módulo solar es conectado a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea la máxima V_m (Tensión máxima) e I_m (Intensidad máxima), que siempre serán menores que tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito respectivamente. En función de estos valores la potencia máxima que puede entregar el módulo solar está dada por:

$$P_m = V_m * I_m$$

Esto nos permite definir un parámetro del módulo solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y está dada por la fórmula:

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}}$$

Así pues, el factor de forma es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. En las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0.7 ó 0.8.

De igual forma cabe recalcar que en un módulo solar la producción de corriente depende de la irradiancia (nivel de iluminación), de tal forma que a medida que aumenta la irradiancia, aumenta la intensidad a través de la célula.

La eficiencia de conversión de un módulo, es decir, el porcentaje total de la energía del sol convertida en energía eléctrica, en otras palabras, es la relación entre la potencia eléctrica de salida en los terminales y la potencia de la radiación solar que incide en la superficie del módulo. Esta depende principalmente de la tecnología con la cual está fabricado, sin embargo, se tiene un valor estándar que se usa como referencia para indicar la irradiancia solar, que es de 1,000 W/m². En la figura 3 se muestran las eficiencias de conversión de las diferentes tecnologías disponibles en el mercado.

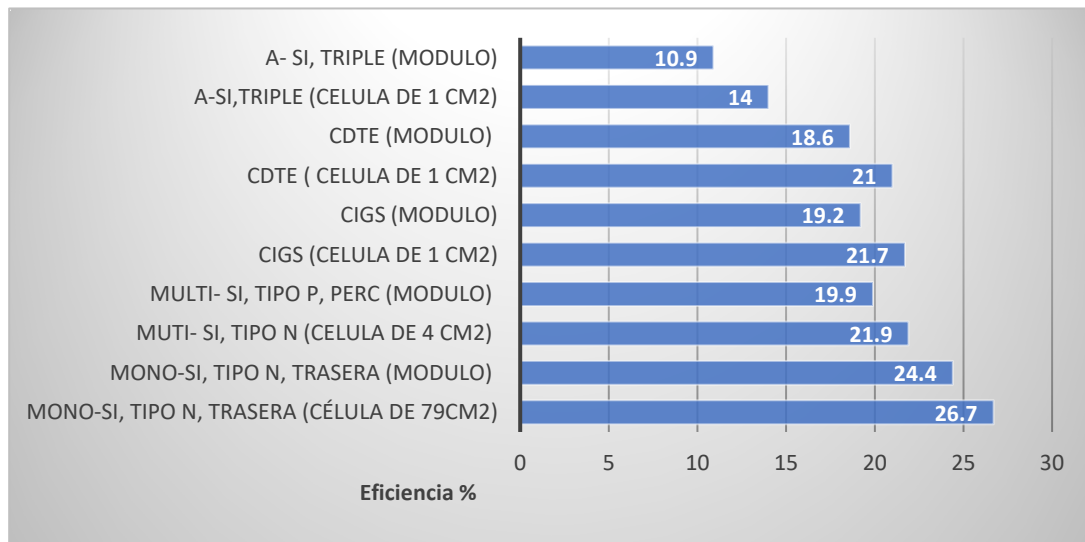


Figura 3 Eficiencias de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos disponibles en el mercado.

Fuente: (Navnotf, y otros, 2019)

La elección de una u otra dependerá de las circunstancias de uso y los requerimientos específicos. La vida media útil de un módulo fotovoltaico es de alrededor de 25 años.

La tecnología de fabricación más difundida se basa en el uso de silicio. Este elemento es purificado y modificado químicamente para lograr las propiedades requeridas. Esta tecnología permite obtener eficiencias de conversión del orden del 18%. Existe también lo que se conoce como tecnología de “película delgada”(Thin Film), cuya fabricación se realiza a partir de la superposición de diferentes películas de espesores nanométricos controlados. Esta tecnología permite fabricar celdas más eficientes, pero a un costo más alto. En los últimos años, el avance tecnológico ha permitido disminuir los costos de fabricación y hoy en día se están acercando a costos competitivos con la tecnología del silicio. Esta tecnología permite obtener eficiencias de conversión del orden del 20%.

Otras tecnologías más eficientes, tal como la “multijuntura o de celdas multicapa” y también más costosas, tienen aplicaciones en usos de concentración o bien espaciales. Esta tecnología permite obtener eficiencias de conversión del orden del 30%. Finalmente existen también módulos fotovoltaicos basados en reacciones

químicas que imitan la fotosíntesis de las plantas. Estas celdas se denominan “fotoelectroquímicas” y a los fines prácticos funcionan de la misma manera que un panel fotovoltaico convencional. Son más eficientes que las convencionales de silicio en condiciones de días nublados, aunque su eficiencia total es menor. La ventaja de esta tecnología es que se fabrica a temperatura ambiente por técnicas de serigrafía. Esta tecnología permite obtener eficiencias de conversión del orden del 6%.

La mayoría de los módulos fotovoltaicos que se comercializan son básicamente de alguna forma de silicio dado que presenta la mejor relación de rendimiento en función de su precio. Las tecnologías de mayor rendimiento son más caras y tienen aplicaciones específicas como por ejemplo la industria aeroespacial.

2.4. Componentes y características de los módulos fotovoltaicos.

Esencialmente, existen tres tipos de tecnologías de celdas de silicio:

- Silicio monocristalino: poseen una estructura cristalina uniforme, donde todos los átomos están perfectamente alineados, formando un solo cristal.
- Silicio policristalino: presentan una estructura cristalina ordenada por regiones, en la que sus átomos presentan distintas direcciones.
- Silicio amorfo: el material semiconductor se deposita como película fina en distintos soportes, lo que permite producir módulos rígidos o flexibles.

Las celdas fotovoltaicas son el corazón del panel solar, pero no su único componente. Todas las celdas requieren de una superficie sobre la cual montarse e interconectarse. Adicionalmente, requieren estar protegidas de la acción de la humedad y la intemperie por lo que están encapsuladas en diferentes materiales como se muestra en la figura 4.

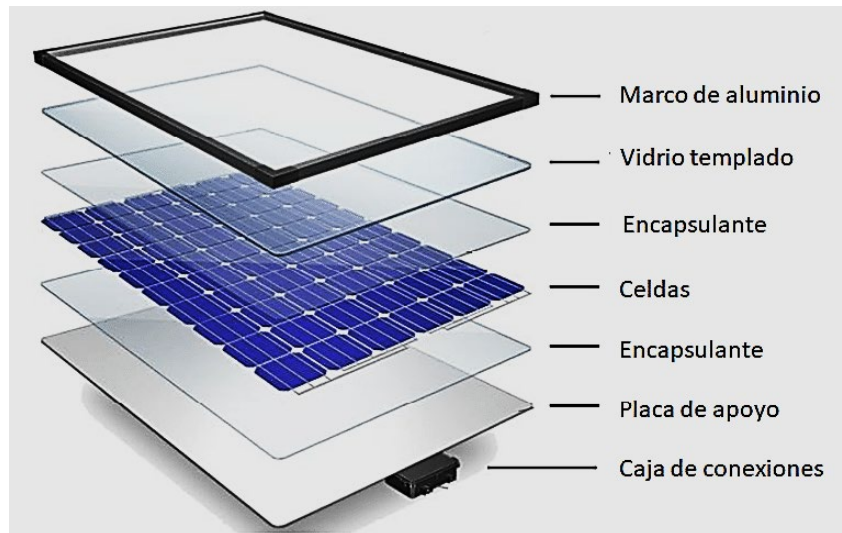


Figura 4 Estructura de los componentes que forman un módulo fotovoltaico

Fuente: (Navnotf, y otros, 2019)

De esta manera con el propósito de caracterizar el funcionamiento de un módulo fotovoltaico, se han definido condiciones de ensayo estándar o normalizadas denominadas, STC (del inglés, Standard Test Condition) que se enumeran a continuación:

- Temperatura de celda de 25°C.
- Irradiancia de 1,000 W/m². La irradiancia es la intensidad de radiación solar por unidad de área de superficie que llega a la Tierra.
- Masa de aire 1.5 (AM 1.5, del inglés Air Mass). La masa de aire cuantifica cuánto se atenúa la energía del sol a medida que pasa a través de la atmósfera y es absorbida por el aire y el polvo. Para la condición AM 1.5, se considera que la altura del sol sobre el horizonte es de aproximadamente 41°.

Si bien las STC difícilmente se encuentren en simultáneo en el mundo real, son ampliamente aceptadas por la industria y son las condiciones mediante las cuales se comparan los rendimientos de las diferentes tecnologías fotovoltaicas. La potencia característica de un módulo fotovoltaico se expresa en “Watt Pico” (Wp) y es la potencia eléctrica que genera en las condiciones STC. Fuera de estas

condiciones específicas, el panel solar puede generar mayor o menor potencia, según las condiciones ambientales donde se encuentre instalado y de las condiciones nominales en las que trabaja la celda fotovoltaica (Irradiancia en la superficie de la celda= 800 W/m. 2 y Temperatura del aire = 20°C). Cada panel posee una curva característica que describe su funcionamiento bajo diferentes condiciones de trabajo. La misma se denomina “Curva I-V”, y describe la variación de la corriente en función de la tensión. Una curva I-V típica de un módulo fotovoltaico se muestra en la figura 5.

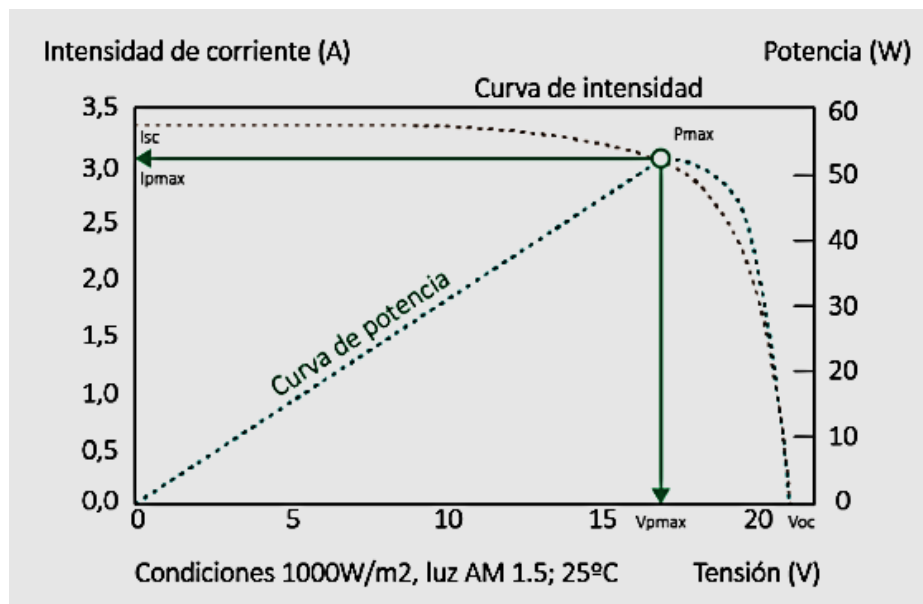


Figura 5 Curva I-V de un módulo fotovoltaico

Fuente: (Auto Solar, 2018)

La determinación de la curva I-V, define los siguientes parámetros característicos de cada panel:

- **Isc:** Corriente de corto circuito (Del inglés, Short Circuit Intensity (Isc)). Indica la máxima corriente que se puede extraer del panel. Esta condición se puede obtener cortocircuitando los dos conectores del panel (tensión cero y máxima corriente).
- **Voc:** Tensión de circuito abierto (Del inglés, Open Circuit Voltage (Voc)). Indica la máxima tensión que se puede obtener del panel. Esta condición se

da midiendo la tensión del panel sin carga, es decir, con los conectores del panel sin conectar (corriente cero y máxima tensión).

- **Imp:** Corriente del punto de máxima potencia (Del inglés, Maximum Power Intensity (Imp)). Indica la corriente que entrega el panel en el punto de trabajo donde se obtiene la máxima potencia.
- **Vmp:** Tensión del punto de máxima potencia (Del inglés, Voltage of Maximum Power). Indica la tensión que entrega el panel en el punto de trabajo donde se obtiene la máxima potencia.
- **Pmax:** Máxima potencia que entrega el panel. Cada panel solar, posee sus especificaciones principales en la parte posterior del mismo.

Raramente se utiliza un único módulo fotovoltaico, ya que para lograr mayores potencias los módulos se interconectan entre sí. Para convertir la corriente continua de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna para un sistema conectado a red o un sistema aislado, es necesario hacer uso de uno o más equipos adicionales que serán explicados más adelante. Dependiendo de la potencia de consumo requerida, esos equipos admitirán una mayor o menor tensión y corriente de entrada. Para obtener los valores requeridos de tensión y corriente es necesario conectar en serie o paralelo los paneles fotovoltaicos. El conexionado en serie suma las tensiones y el conexionado en paralelo suma las corrientes.

La figura 6 muestra los resultados de conexión de dos paneles fotovoltaicos de 220 Wp en serie o paralelo. Nótese que la potencia obtenida de 440 Wp es la misma en ambas configuraciones

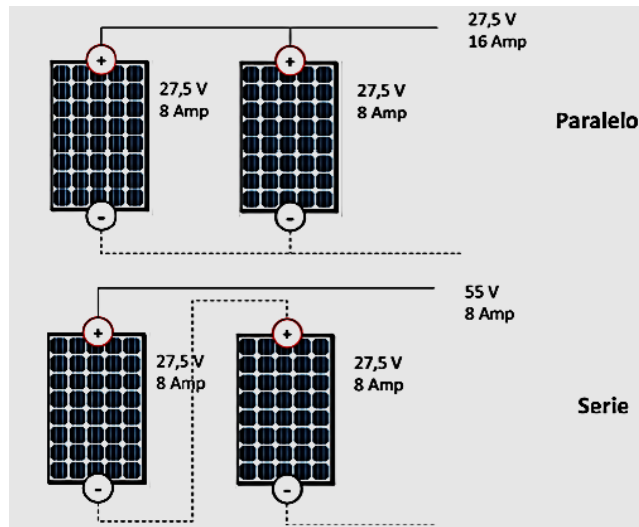


Figura 6 Conexión en serie o paralelo de paneles para obtener mayor tensión o corriente.

Fuente: (Navnotf, y otros, 2019)

Varios paneles conectados en serie también se conocen internacionalmente como “cadena” (en inglés, “string”). De esta manera, una instalación puede estar formada por varias cadenas conectadas en paralelo. En la mayoría de los casos, los paneles fotovoltaicos se comercializan con dos cables de salida, uno para el polo positivo (+) y otro para el polo negativo (-).

En sus extremos poseen unos conectores especiales que aseguran un buen contacto eléctrico y evitan la entrada de polvo y humedad. Si bien hay modelos de varios fabricantes, los más utilizados son los MC4 (MC son las siglas del fabricante “Multi-Contact”, el número indica el diámetro del pin de contacto). Los MC4 permiten conectar cadenas de paneles que se pueden construir fácilmente empujando los conectores de los paneles adyacentes, únicamente utilizando la mano

El sistema MC4 consiste en un diseño de conector macho y hembra, los cuales se colocan dentro de carcasas de plástico. Para un sellado adecuado, los MC4 requieren el uso de un cable con el diámetro correcto, normalmente de doble aislamiento y protección UV, dado que la mayoría de los cables se deterioran si se

utilizan al aire libre sin protección de la luz solar (también conocido como cable “Solar”). El uso de cables que no cumplan con estas características no permitirá que los conectores MC4 actúen normalmente y puede ocurrir que se pierda la estanqueidad de estos.



Figura 7 Conectores MC4 macho y hembra, armados para su uso. Despiece de conectores y accesorios para conectar en serie y paralelo de varias filas o strings.

Fuente: (Navnotf, y otros, 2019)

2.5. Inversores.

El inversor es un elemento central de la instalación fotovoltaica la cual se interconecta la red eléctrica. Además de realizar la conversión continua a alterna, el inversor debe sincronizar la onda eléctrica generada con la de la corriente eléctrica de la red, para que la compatibilidad sea total. El inversor dispone de funciones de protección, para garantizar la calidad de la electricidad vertida a la red como la seguridad de la propia instalación y de las personas. Su función principal es convertir la corriente continua de la instalación en corriente alterna, igual a la utilizada en la red eléctrica: desde 46 kV hasta 115 kV y una frecuencia de 60 Hz.

Es un elemento imprescindible en las instalaciones conectadas a la red y estará presente en la mayoría de las instalaciones de autoconsumo, sobre todo en aquellas destinadas a la electrificación de viviendas.

Las características deseables para un inversor DC-AC las podemos resumir en las siguientes:

- Alta eficiencia: Debe funcionar bien para un amplio rango de potencias
- Bajo consumo en vacío: Cuando no presente cargas conectadas
- Alta fiabilidad: resistencia a los picos de arranque
- Protección contra cortocircuitos
- Seguridad
- Buena regulación de la tensión y frecuencia de salida, que como ya hemos comentado debe ser compatible con la red eléctrica.

Los parámetros que determinan las características y prestaciones de un inversor son los siguientes:

- Potencia: Determinará la potencia máxima que podrá suministrar a la red eléctrica en condiciones óptimas. La gama de potencias en el mercado es enorme, sin embargo, para los sistemas domésticos existen desde 50W.
- Fases: Normalmente los inversores cuyas potencias es inferior a 5 kW son monofásicos. Los mayores a 15 kW suelen ser trifásicos. Muchos de los modelos monofásicos pueden acoplarse entre sí para generar corriente trifásica.
- Rendimiento energético: Debería ser alto en toda la gama de potencias a las que se trabajará. Los modelos actualmente en el mercado tienen un rendimiento medio situado en torno al 90%. El rendimiento del inversor es mayor cuanto más próximos estamos a su potencia nominal y; con el fin de optimizar el balance energético, es primordial hacer coincidir la potencia pico del campo fotovoltaico y la potencia nominal del inversor.
- Protecciones: El inversor debería incorporar algunas protecciones generales, como mínimo, las cuales serían las siguientes:
Interruptor automático: funcionamiento (en la isla), limitador de la tensión máxima y mínima.

2.6. Residuos generados por los módulos

En cuanto a los residuos generados por los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil estos pueden ser clasificados de la forma siguiente:

1. La clasificación denominada “aprovechamiento de valor” la cual se fundamenta en la incorporación de los residuos una vez generados ya sea de manera de reciclaje, reutilización, reincorporación y eliminación;
2. La estipulada en el convenio de Basilea, la cual se basa en su potencialidad de peligrosidad al ambiente: estableciéndolos en desechos inertes, desechos no peligrosos y desechos peligrosos.
3. La tercera es según el origen especial del residuo. Los residuos de módulos fotovoltaicos, se encuentra clasificados por sus componentes como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos o RAEE, y al estar constituidos por componentes electrónicos deben ser manejados de acuerdo con las características específicas para su grupo, por lo que no pueden ser incorporados de una manera tan rápida nuevamente al mercado ya que poseen un mayor potencial de peligrosidad y toxicidad a los seres humanos y al medio ambiente como tal (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018).

Los residuos generados al final de la vida útil de los paneles solares, tanto los de silicio policristalinos como los de películas delgadas, corresponden a un material con gran potencial de reciclaje y reutilización pues los componentes de vidrio, los polímeros basados en Etil-Vinil-Acetato (EVA), las placas de aluminio de los marcos y láminas de soportes, tienen bastantes salidas a nuevos mercados, ya que su desintegración y separación de los paneles solares resulta ser una operación sencilla, rápida y muy limpia si se tiene en cuenta que prácticamente salen de manera puros y con poca alteración con los otros componentes. (Parvez, Candace, Nazmut, & Shahjadi, 2018).

El porcentaje de estos materiales reciclables en relación con la masa y al volumen de los residuos generados por los paneles solares está por encima del 90% en ambos tipos de paneles solares. (IRENA and IEA-PVPS. International Renewable

Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016).

Sin embargo, en algunos casos los componentes utilizados en la fabricación de celdas solares fotovoltaicas y conductores se suelen mezclar con metales por temas de costos o por conferirles propiedades adicionales, y al hacerlo disminuyen su potencial de reciclaje que puede rondar el 4% para los paneles de sílice y del 2% para los de películas delgadas, esto se debe a que su separación de los otros componentes se requieren grandes cantidades de energía y de un tratamiento especial dado las características fisicoquímicas de cada uno de estos metales seleccionados en su fabricación.

En las Tablas 1 y 2 se relacionan las principales afectaciones derivadas del uso de estos elementos en ambos tipos de módulos solares.

Tabla 1 Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en los paneles de silicio.

Capa	Material	Impacto ambiental
Celdas solares policristalinas e interconexiones metálicas	Silicio	El silicio es el material de mayor porcentaje que se encuentra en las celdas de paneles policristalinos y monocristalinos; no se disuelve bien en el agua, pero al estar expuesto al aire libre puede generar material particulado con un nivel de toxicidad bajo.
	Plomo	Puede generar lixiviados al contacto con el agua, afectando ecosistemas, porque queda en el suelo y/o en cuerpos de agua. En animales y humanos afecta el sistema nervioso, cardíaco y respiratorio, en concentraciones altas puede causar la muerte.
Caja de conexiones	Caja de conexiones	La disposición en un relleno es muy difícil después de la compactación, sin embargo, es posible un coprocesamiento (convertirlo en materia prima o combustible de un proceso industrial específico)
Marco	Aluminio	Este material no contamina ya que puede ser reciclado y reutilizado, vendido como elemento de baja calidad por sufrir deformaciones al momento de la separación. Sin embargo, la cubierta posterior contiene en algunos casos

Capa	Material	Impacto ambiental
		flúor que en tratamientos térmicos puede desprender emisiones.
Vidrio protector	Vidrio	El vidrio es un material que puede ser vendido como materia prima, posterior al proceso queda triturado como calcín (fragmentos de aproximadamente 4 mm de longitud de vidrio reciclado).
El encapsulante	Polímero (EVA)	Por su difícil desprendimiento de la cubierta posterior, es complejo llevar a cabo su tratamiento, sin embargo, es un material fácil de reciclar y reutilizar cuando está libre, clasificándose como plástico. En algunos casos ha sido recomendado probar termoplásticos que faciliten la separación del material.

Fuente: (Sierra, Vásquez, & Ramírez-Piscoc, 2020)

Tabla 2 Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en paneles de película delgada.

Capa	Material	Impacto ambiental
Celdas solares de película delgada CIGs e interconexiones metálicas	Selenio	Con un 53% es el material de mayor porcentaje en los paneles de películas delgadas CIG. Una gran exposición en el aire puede generar en el ser humano mareos y fatiga; en contacto con el agua puede formar ácido de selenio. Sin embargo, esto no genera grandes afectaciones a los seres vivos ni ecosistemas, ya que las reacciones con diferentes sustancias no son estables en el tiempo
	Cobre	La exposición de cobre para la salud humana no presenta mayor riesgo, sin embargo, cuando este se concentra en grandes cantidades en el suelo afecta el crecimiento de plantas, volviendo el suelo infértil, igualmente cuando un animal ingiere el cobre por estar presente en las plantas, puede ser mortal.
	Galio	El galio puro no presenta riesgos para el ser humano, sin embargo, cuando se presenta en compuestos puede afectar la salud, como dificultad en la respiración o dolores de cabeza. Afecta cuerpos de agua cuando su concentración es elevada, pues se requiere sustancias radioactivas para su separación

Capa	Material	Impacto ambiental
	Indio	Altamente tóxicos para la salud humana, pero no han sido investigados los efectos que puedan presentarse al medio ambiente
Celdas solares de película delgada CdTe y interconexiones metálicas	Cadmio	Es un metal pesado de mayor porcentaje en las celdas de paneles de película delgada CdTe, este material es cancerígeno tanto para animales y personas en concentraciones de 50 mg/hora puede ser mortal, igualmente al contacto con agentes corrosivos o ácidos genera lixiviados, afectando ecosistemas.
	Telurio	La inhalación de telurio puede causar afectaciones en el sistema nervioso central y su ingestión dolor abdominal, estreñimiento y vomito
Caja de conexiones	Caja de conexiones	La disposición en un relleno es muy difícil después de la compactación, sin embargo, es posible un coprocesamiento (convertirlo en materia prima o combustible de un proceso industrial específico) que genera una alta carga ambiental
Marco y cubierta posterior	Aluminio	Este material no contamina ya que puede ser reciclado y reutilizado, vendido como elemento de baja calidad por sufrir deformaciones al momento de la separación. Sin embargo, la cubierta posterior contiene en algunos casos flúor que en tratamientos térmicos puede desprender emisiones.
Vidrio protector	Vidrio	El vidrio es un material que puede ser vendido como materia prima, posterior al proceso queda triturado como calcín.
El encapsulante	Polímero (EVA)	Por su difícil desprendimiento de la cubierta posterior, es complejo llevar a cabo su tratamiento, sin embargo, es un material fácil de reciclar y reutilizar cuando está libre, clasificándose como plástico.

Fuente: (Sierra, Vásquez, & Ramírez-Piscoc, 2020)

Igualmente, los procesos fisicoquímicos que se realizan posteriores a la separación manual y mecánica presentan afectaciones a los ecosistemas y es este uno de los pasos donde se puede evidenciar la viabilidad de la recuperación de las celdas

fotovoltaicas, considerando los siguientes impactos ambientales ocasionados por los procesos fisicoquímicos:

- Electrólisis, separa la solución con metales contaminantes. La electrólisis es un método que se ha aplicado para la recuperación del medio ambiente a través de los diferentes tipos de disoluciones y es el de menor impacto para el ambiente en el caso de recuperación de los metales tóxicos provenientes de la lixiviación.
- Lixiviación ácida, separa las cenizas de silicio cristalino. Actualmente esta técnica para las cenizas de silicio cristalino no cuenta con suficiente estudio a profundidad para la afectación al medio ambiente y la salud humana, pero para los casos como la lixiviación en el proceso del oro, cobre o bacteriana suele contaminar cuerpos de agua severamente.
- Pirolisis en continuo con gasificación, la cual separa el polímero EVA y las celdas de silicio. Esta técnica a pesar de manejar de manera casi nula o en proporciones pequeñas la concentración de oxígeno, genera productos de combustión incompleta, dioxinas y furanos cuando es aplicada a escala comercial, los cuales son contaminantes para el ambiente, estos furanos y dioxinas pueden afectar el sistema inmune de los humanos y desarrollar cáncer; igualmente cuando son liberados a la atmósfera se depositan en suelos y vegetación, por su tamaño minúsculo son insolubles en el agua y logran acumularse en organismos y alimentos.

2.7. Proyección de los residuos generados por módulos fotovoltaicos.

La capacidad instalada para la generación de energía solar, en El Salvador, mostró una tendencia de incremento en el periodo de 2013 a 2021, como puede observarse en la Figura 8. En 2021, se alcanzaron los 478MW, lo que representó un crecimiento de alrededor del 18,6% en relación con 2019. A medida siga creciendo la capacidad instalada, también irá en incremento la cantidad de módulos solares que llegan al final de su vida útil, que ronda aproximadamente los 20 años.

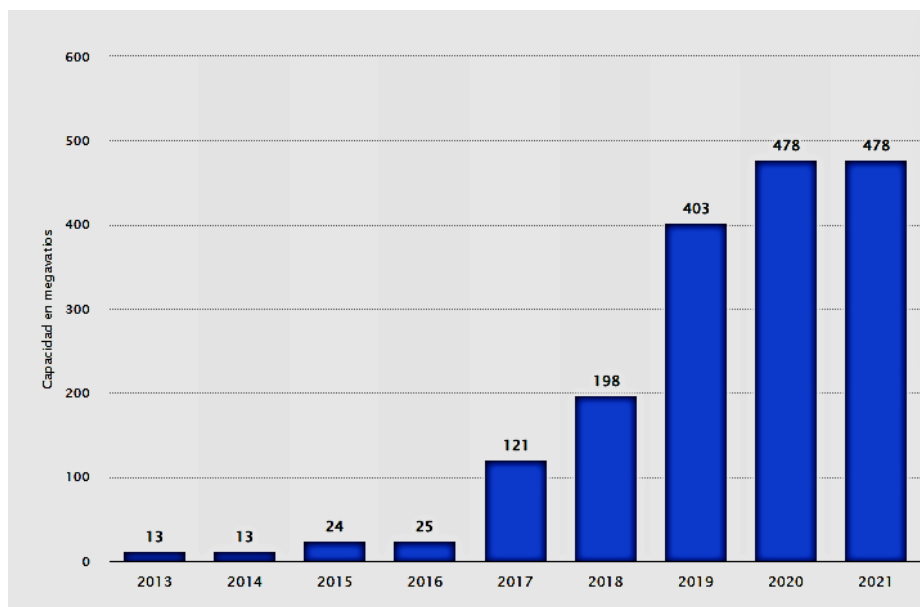


Figura 8 Capacidad instalada de energía solar en El Salvador de 2013 a 2021.

Fuente: (Statista, 2022)

Por lo que en los últimos años se han realizado varios estudios acerca del análisis de ciclo de vida de esta fuente de energía y sus distintos componentes incluidos los paneles solares, donde se evidencian los impactos ambientales que se tendrían a futuro en las etapas de desmontaje y destrucción de los paneles solares fotovoltaicos, de existir un mal manejo debido a las características potencialmente peligrosos de algunos de sus componentes. (Chaparro, 2019)

Actualmente, la gran mayoría de los residuos de paneles fotovoltaicos proceden de la producción o de la rotura en los dos primeros años de vida de un panel fotovoltaico, debido normalmente a una instalación incorrecta. Sin embargo, las cifras de residuos de producción son información sensible que no comparten los productores, tanto el Dr. Karsten Wambach, de Sunicon, una división de SolarWorld, como Knut Sander, de Ökopol, estimaron la generación de residuos fotovoltaicos en Alemania en 2010 es aproximadamente 15,000 toneladas. Esta cifra incluye los residuos de producción, los paneles rotos y los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. De estas 15,000 toneladas de residuos fotovoltaicos totales, los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil representan entre 3,000 y 5,000 toneladas. Knut

Sander, de Ökopol, estima que la tasa actual de recogida de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil se sitúa entre el 20% y el 30%, y que casi el 100% de los paneles fotovoltaicos recogidos se reciclan. Como las posibilidades de reciclaje pueden variar según el tipo de tecnología, Ökopol citó que, en un mundo ideal, las tecnologías de paneles fotovoltaicos se recogerían por separado para su reciclaje.

CAPÍTULO 3 FALLAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para garantizar el correcto funcionamiento de un sistema fotovoltaico es importante que todos sus componentes se encuentren en óptimas condiciones. Esta premisa es difícil de lograr considerando que la mayor parte de sus componentes se encuentran expuestos a las condiciones climáticas del sitio de implantación, además del envejecimiento de sus componentes a través del tiempo y daños ocasionales durante su fabricación y transporte hasta el sitio.

Las fallas que ocurren con mayor frecuencia son en los módulos fotovoltaicos. Estas pueden desencadenarse por factores externos tales como las condiciones ambientales propias del sitio de implantación: temperatura, humedad, calidad del aire, radiación entre otras que afectan la eficiencia del módulo fotovoltaico.

Asimismo, existen condiciones internas que pueden originar fallas en el sistema fotovoltaico debidos a conexiones eléctricas defectuosas, daños ocasionales en el proceso de fabricación, mala manipulación en la instalación afectando su rendimiento.

3.1 Definición

Falla de Módulo Fotovoltaico. Efecto que degrada la potencia del módulo el cual no se revierte por la operación normal o crea problemas de seguridad. Un problema meramente cosmético que no tiene como consecuencia los efectos antes mencionados no se considera una falla del módulo solar. Una falla del módulo es relevante para efectos de garantía cuando ocurre bajo condiciones que el módulo experimenta durante su operación normal.” (Köntges, y otros, 2014)

3.2 Fallas tempranas

El estudio realizado por IRENA en 2014 concluyó que las fallas tempranas más comunes, de mayor a menor porcentaje de ocurrencia o suceso, y reportadas por los generadores son las siguientes:

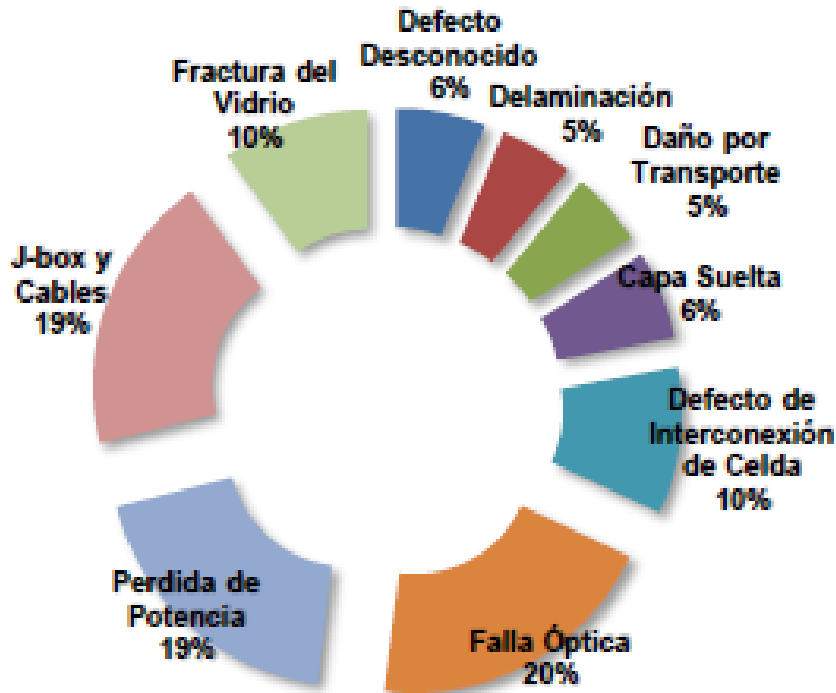


Figura 9 Tipos de fallas en paneles fotovoltaicos

Fuente: (IRENA, 2019)

Resumiendo lo anterior las pérdidas asumidas en este escenario son las siguientes.

- 0.5% de paneles solares llegará al final de su vida útil por daños en el transporte de estos al sitio de instalación o uso.
- 0.5% de paneles solares llegará al final de su vida útil en los primeros dos años por culpa de una mala instalación.
- 2% de paneles solares llegará al final de su vida útil después de 10 años debido a problemas técnicos.
- 4% de los paneles solares llegará al final de su vida útil después de 15 años debido a problemas técnicos.

Para efectos de este estudio se ha considerado la gestión de residuos o desechos de paneles fotovoltaicos producidos únicamente por fallas tempranas. Se ha tomado este criterio debido a que esta problemática es más inmediata y actual ya que la mayoría de las plantas fotovoltaicas de El Salvador tienen a la fecha un periodo de operación menor a 10 años.

Estas fallas están relacionadas directamente con factores climáticos, que contribuyen a la degradación de los módulos fotovoltaicos y por ende la generación de potencia eléctrica. Estas pérdidas usualmente afectan a los módulos dependiendo de las condiciones propias del ambiente externo al que están expuestos. Algunas de las fallas más comunes se encuentran:

A. Fallas por pérdida de potencia.

La pérdida de potencia de los módulos fotovoltaicos debido a la temperatura es de los mayores enemigos del rendimiento en su generación energética. Por lo que es falso que mientras más caluroso y soleado se encuentre el clima los paneles funcionan mejor. La temperatura óptima oscila entre los 20 y los 25° C.

B. Fallas por polvo o suciedad.

En verano las pérdidas suelen ser más significativas debido a la acumulación de polvo sobre la superficie es por eso que es conveniente, para no afectar el rendimiento, realizar la limpieza de los paneles con mayor frecuencia que en el invierno ya que las lluvias contribuyen a la limpieza de módulos fotovoltaicos.

C. Falla óptica.

La cantidad de radiación recibida por las células solares en el interior del módulo fotovoltaico es inferior a la que llega a la superficie de este, debido a la reflexión y la suciedad de la superficie del módulo. Las pérdidas de reflexión óptica en la interfaz (vidrio o polímero), debido a la diferencia en los índices de refracción, puede llegar hasta 8 o 9% en el espectro visible de la radiación solar.

D. Falla por defecto de interconexión de celda.

Son originadas por la conexión de los módulos fotovoltaicos de potencias levemente diferentes que forman un sistema fotovoltaico. En la práctica, si se conectan dos módulos en serie con diferentes corrientes, el módulo de menor corriente restringirá la corriente de la serie.

E. Fallo por daño durante el transporte

Está relacionado con las fallas que son ocasionadas por el traslado de los módulos fotovoltaicos al sitio de instalaciones. Regularmente estas fallas aparecen durante la ejecución. Los módulos rotos o con grietas pueden seguir funcionando correctamente sin embargo el riesgo de un fallo eléctrico o la entrada de humedad al mismo aumenta de forma considerable. Se recomienda establecer un procedimiento adecuado de transporte para reducir fallas.

F. Falla por delaminación.

La delaminación ocurre cuando se pierde adhesión entre los diferentes elementos que componen el módulo fotovoltaico.

Dicha pérdida de adhesión puede darse entre el encapsulante polimérico y las células fotovoltaicas, entre las células fotovoltaicas y el vidrio de la cubierta frontal o entre la cubierta posterior y el encapsulante.

Esto supone un problema de gran envergadura porque causa dos efectos: se incrementa la reflexión de la luz, por tanto, se pierde luz aprovechable para el efecto fotovoltaico y se facilita la entrada de humedad en el módulo fotovoltaico con consecuencias no deseadas pudiendo generarse otro modo de degradación que es la corrosión. En climas calurosos y húmedos la delaminación se ve favorecida por la existencia de agua en el ambiente.

G. Falla por fractura de vidrio

La rotura del vidrio de la cubierta es un factor muy importante de degradación en módulos fotovoltaicos. Las roturas y grietas vienen seguidas normalmente de la aparición de otros modos de degradación tal como pueden ser la corrosión, la decoloración o la delaminación. También existen las roturas intempestivas de módulos que ocurren de forma súbita y que pueden ser debidas a actos vandálicos, caída de árboles, postes o a cualquier situación no esperada

H. Falla en las cajas de unión o j-box y cables.

Es una falla de detección sencilla ya sea por simple vista o cámara termográfica y se refiere a la conexión no adecuada de los conductores eléctricos desencadenando problemas que van desde el calentamiento de las cajas de conexión al sobrecalentamiento del “string” y por ende de la reducción rendimiento.

3.3 Fallas Regulares

Los paneles fotovoltaicos son una parte fundamental en los sistemas fotovoltaicos por este motivo para obtener el máximo rendimiento debemos saber cuáles son las fallas más comunes en su funcionamiento. Por lo general las fallas regulares en los paneles pueden darse en cualquier momento de su vida útil, no específicamente en los primeros años de funcionamiento.

Efecto de la temperatura

La potencia de salida de un módulo fotovoltaico viene condicionada por la irradiancia solar (W/m^2) y la variación de la temperatura que las células alcanzan. A mayor irradiancia mayor es la potencia generada, lo que a su vez significa un aumento en la temperatura de las celdas que conforman el módulo fotovoltaico. El punto de equilibrio de las condiciones anteriores brindará una mayor producción energética al sistema fotovoltaico.

Efecto del polvo

Debido a la exposición a las condiciones climáticas, los módulos fotovoltaicos son propensos a acumular material particulado sobre su superficie. Esta capa de polvo genera el efecto sombra o “soiling” ocasionando que los fotones que provienen del sol interactúen con las celdas generando un nivel menor de corriente y por tanto una potencia de salida menor.

Efecto de fisuras y fracturas

Entre las fallas regulares el efecto de fisura es de los problemas más complejos ya que no es posible su reparación por lo tanto solo puede ser reemplazado por otro módulo. Estos daños suelen ser ocasionados por el impacto de objetos debido a efectos medioambientales y por la intervención de terceros. Además, también son propensos a las fallas ocasionadas en el transporte de los módulos y su instalación.

Estas fracturas pueden ocurrir en la capa cristalina que recubre la celda como en las obleas de material semiconductor en su interior.



Figura 10 Módulo con fractura

Fuente: Planta Solar Metapán, El Salvador.

Efecto de Microfracturas

Se le llama microfractura a una rotura dentro de una celda fotovoltaica la cual no es posible ser identificada a simple vista volviéndolo imposible de corregir por lo que únicamente puede ser reemplazada. Sus consecuencias son similares a los de las fracturas mayores disminuyendo la generación de energía. El principal origen de esta falla es debido al manejo erróneo en el ensamblaje de los módulos y las altas temperaturas, provocando que las capas semiconductoras de la celda cedan ante el efecto y se formen fracturas en ellas. Pueden ser detectadas mediante el método de electroluminiscencia y técnicas termográficas. Para este último caso, este efecto ocasiona que la celda posea zonas con niveles de temperatura mayores a los que puedan soportar creando roturas en el cristal. A estos puntos de calor son denominados “hot spots”.

Efecto Hot Spots

Los Hot Spot o puntos calientes son áreas focalizadas en el módulo fotovoltaico que presenta temperaturas elevadas que afectan a una sola zona del panel y tiene por consecuencia disminución de eficiencia generando una menor potencia de salida

además de una aceleración en la degradación de los materiales en la zona afectada incluso ocasionar incendios sobre si y las celdas aledañas.

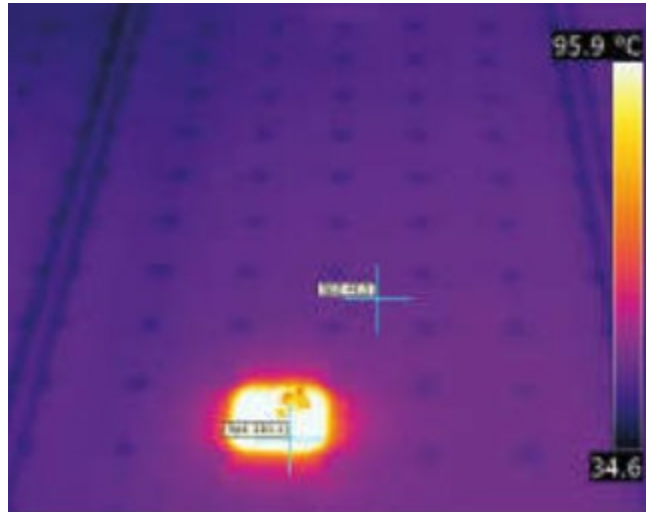


Figura 11 Proceso de generación de un Hot spot

Fuente: M. Diehl

Falla por impacto de descargas atmosféricas.

Las instalaciones fotovoltaicas están expuestas a condiciones meteorológicas que pueden afectar a su rendimiento. El impacto directo y el efecto inductivo del rayo pueden deteriorar, e incluso destruir, los módulos de las placas fotovoltaicas, los reguladores de carga y otros componentes electrónicos de la instalación. La alta incidencia de estos eventos hace imprescindible protegerlos, utilizando protectores contra sobretensiones y pararrayos

3.4 Métodos para la determinación de fallas.

3.4.1 Análisis Termográfico.

Con esta metodología es posible detectar fallas en módulos fotovoltaicos mediante el espectro infrarrojo las cuales son analizadas digitalmente para identificar las zonas con anomalías térmicas bajo dos tipos de imágenes termográficas: capturas frontales y las imágenes termográficas aéreas mediante un drone.

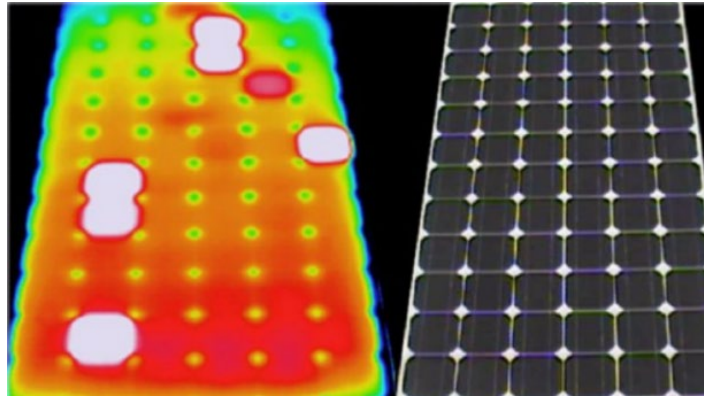


Figura 12 Imagen de cámara termográfica con Drone

Fuente: Internet

3.4.2 Electroluminiscencia.

Este método permite identificar defectos de celdas (grietas), defectos tecnológicos y variaciones en las propiedades de las celdas fotovoltaicas a lo largo de la superficie, provenientes de manejos no adecuados de los módulos tales como transportes, métodos deficientes de limpieza, degradación natural y/o acelerada, entre otros. Funciona bajo el principio de detección de radiación electroluminiscente que emiten los portadores de carga durante la recombinación radiactiva.

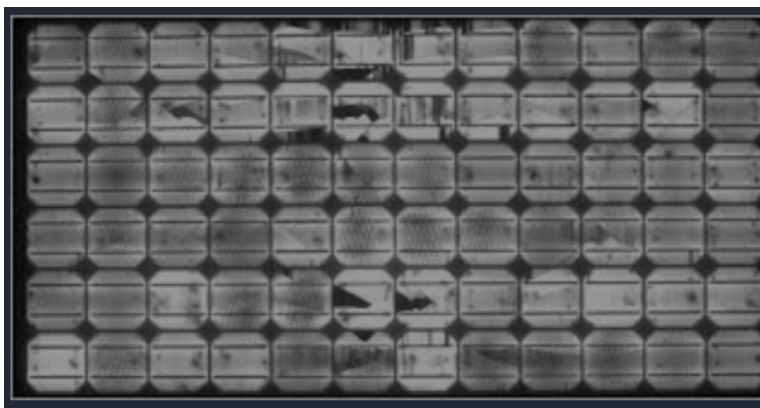


Figura 13 Imagen de detección de fallos mediante electroluminiscencia

Fuente: Internet

3.4.3 Análisis del espectro visible.

Las imágenes del espectro visible son utilizadas para analizar el estado físico de los módulos fotovoltaicos, especialmente para identificar golpes y fisuras. Así mismo como lo hace las imágenes termográficas se busca detectar las zonas donde hay acumulación de trazadoras o rajaduras, siendo estas identificadas en la imagen para posteriormente proceder a la validación y así concluir si corresponden a golpes sobre el módulo fotovoltaico.

CAPÍTULO 4 MARCO LEGAL DE DISPOSICIÓN FINAL Y RECICLAJE DE MODULOS FOTOVOLTAICOS EN EL SALVADOR.

4.1 Antecedentes.

Para 2015 la capacidad instalada de global alcanzo los 222 (GW) y se espera que para 2050 esta capacidad aumente a más de 4,500 GW.

A medida aumenta el mercado de instalaciones fotovoltaicas a nivel mundial, también aumentará el volumen de paneles fotovoltaicos retirados debido a que estos necesitarán gestionar los residuos al final de su vida útil. Se espera que para finales de 2016 los desechos fotovoltaicos globales acumulados alcancen entre 43,500 y 250,000 toneladas métricas. Debido a la vida útil promedio del panel es de 30 años, se prevén grandes cantidades de desechos anuales para principios de la década de 2050 unos 5.5 a 6 millones de toneladas casi igualando la masa contenida en las nuevas instalaciones que sería de aproximadamente 6.7 millones de toneladas (IRENA, 2019) (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

En cuanto al contexto nacional, el país ha acompañado las energías renovables sobre todo la solar fotovoltaica muestra de esto es que entre 2013 y 2018 se han incluido a la matriz energética 94 MW en proyectos fotovoltaicos en el mercado mayorista y aproximadamente 121.8 MW en proyectos de energía distribuida. Se prevé que para 2023 se incorporen 369.9 MW y se toma en cuenta los proyectos que el CNE prospecta que están en proceso de aprobación de permisos medio ambiental, proyectos con alto potencial de ejecución por intereses de inversores se puede estimar que para 2023 es altamente probable que 617.3 MW se añadan a la matriz energética (CNE, 2018).

El Salvador actualmente no cuenta con un marco legal específico para la recolección de desechos producto de paneles solares, pero si cuenta con un programa nacional para el manejo integral de los desechos que sirve como base.

La Ley de Medio Ambiente, en su artículo 52, responsabiliza al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales para formular un Programa Nacional para el Manejo Integral de los Desechos Sólidos (MINDS) esto en coordinación con el Ministerio de

Salud y Asistencia Social, gobiernos municipales y todas las demás organizaciones competentes (MARN, 2017)

Los objetivos de este programa son:

1. Promover la adopción de hábitos y prácticas de consumo sostenibles para así reducir la generación de desechos sólidos y aumentar el reciclaje de estos.
2. Alcanzar cobertura universal y de calidad de los servicios de manejo de desechos sólidos aplicando un sistema de manejo integral y sostenible.
3. Promover el manejo integral de los desechos sólidos en coordinación con las instituciones competentes, la responsabilidad empresarial, la participación ciudadana y el acceso a la información.

Para llevar a cabo los objetivos del programa se plantearon los siguientes planes:

1. Plan Nacional de sensibilización en MIDS

Se busca promover el cambio de hábitos en la población, mediante las prácticas de reducir, reutilizar y reciclar. Además, se plantea el desarrollo de programas de reducción y separación de desechos desde la fuente que los generan. (Guía técnica para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de El Salvador, 2017)

2. Plan Nacional para el Mejoramiento del Manejo de los Desechos Sólidos.

Esta parte del programa tiene como objetivo proveer de infraestructura adecuada para el tratamiento y disposición final de los desechos sólidos mediante la construcción o ampliación de rellenos sanitarios, plantas de compostaje y recuperación (MARN, 2017)

3. Plan Nacional de recuperación de desechos sólidos.

Este plan parte de las siguientes premisas:

- a. El residuo puede ser reducido en cantidad o calidad aplicando procesos de producción, consumo y comercialización que lo minimicen y/o eliminen.
- b. Los residuos tienen la posibilidad de ser reutilizados o potenciar su uso.
- c. Para dar valor a los residuos se tiene que optimizar sus características: forma, materia y energía, usando procesos reutilización, recuperación y reciclaje. (MARN, 2017)

El plan de recuperación de desechos sólidos contempla los siguientes 5 tipos de desechos sólidos:

1. Desechos comunes.
2. Llantas en desuso.
3. Desechos de construcción.
4. Otros desechos voluminosos.
5. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y luminarias.

4.1.1 Proyección de ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares en El Salvador (USD)

Tabla 3 Proyección de ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares en ES (USD)

Año	El Salvador	Resto de Latinoamérica	Total
2017	55	5,284.41	5,339.40
2018	61.96	5,944.91	6,006.86
2019	70.54	6,756.78	6,827.32
2020	63.45	6,063.94	6,127.39
2021	79.07	7,544.69	7,623.76
2022	93.28	9,027.89	9,121.17
2023	106.7	10,476.31	10,583.01
2024	117.72	11,728.72	11,846.44
2025	129.33	13,078.16	13,207.49
2026	141.91	14,568.07	14,709.98
2027	155.55	16,214.79	16,370.34
2028	170.33	18,033.21	18,203.54
CAGR*	10.56%	12.22%	12.21%

* Tasa de crecimiento anual compuesto

Fuente: El Salvador Solar Panel Recycling Market Research Report 2021-2028.

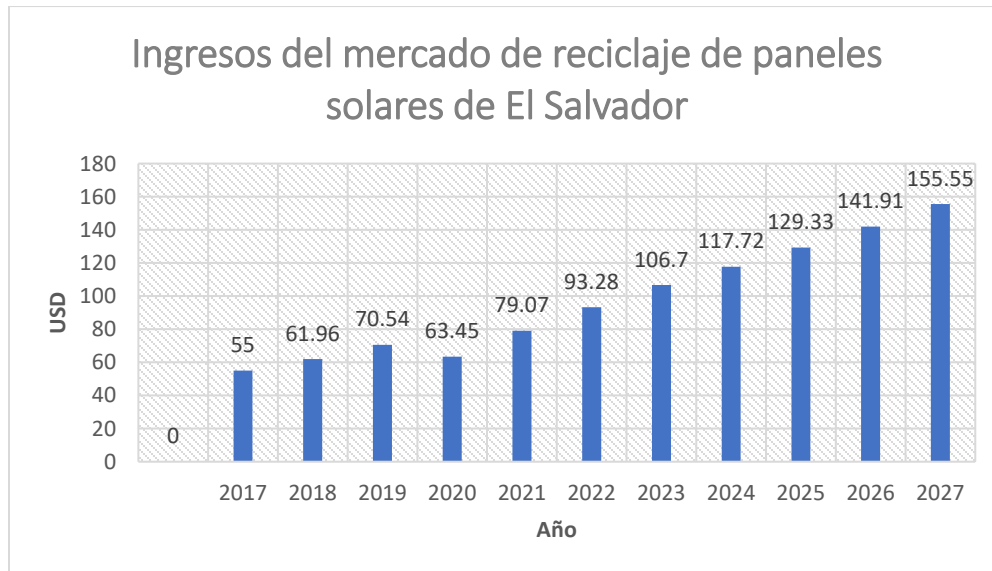


Figura 14 Ingresos del mercado de reciclaje de paneles solares de El Salvador

Fuente: El Salvador Solar Panel Recycling Market Research Report 2021-2028.

4.2 Procedimiento existente para el desarrollo u operación de actividades o generación de electricidad a partir de tecnología solar fotovoltaica.

En este apartado se abordará el procedimiento legal y lo que conlleva el desarrollo, ejecución, operación y cierre de un proyecto de generación de energía de tecnología fotovoltaica.

- **Ley de Medio Ambiente de El Salvador.**

El articulado de la Ley de Medio Ambiente de El Salvador establece su artículo 19 que para dar inicio de obras o proyectos y actividades se debe contar con un permiso ambiental siendo el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales el encargado de emitirlo, además, este debe de incluir una previa aprobación del estudio de impacto ambiental. Dicho permiso obliga al titular de la actividad, obra o proyecto a ejecutar acciones de prevención establecidas en el Programa de Manejo Ambiental que está dentro del Estudio de Impacto Ambiental según el artículo 20 y la aplicación del permiso de ubicación y construcción comprende el periodo de construcción de la obra física, posterior a ello se emitirá el permiso ambiental de funcionamiento por el tiempo de su vida útil y etapa de abandono (MARN, 2007).

Los proyectos de generación de energía eléctrica entran en la categoría de proyectos que requieren un estudio de impacto ambiental según el artículo 21 literal f) y g). En cuanto a la elaboración del estudio de impacto ambiental que realizará el titular del proyecto, las directrices están detalladas en el artículo 24, 25, 26, 27, 28 y 29. (MARN, 2007)

4.2.1 Categorización de proyectos destinados al aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica.

A partir de junio de 2012 el Ministerio de Medio Ambiente a través del acuerdo N°39 introdujo las categorías para las actividades de obras o proyectos según la Ley del Medio Ambiente que tienen la finalidad de: aprovechamiento de energía solar para la generación de calor o energía eléctrica, generación de electricidad a partir del aprovechamiento del recurso hídrico y aprovechamiento del recurso geotérmico.

A continuación, se va a desarrollar las categorías y los requisitos que deben de tener los proyectos generación de energía a partir de recurso solar según la categoría en la que se sitúe. Hay que destacar que estas categorías son aplicables para las tecnologías fotovoltaica, solar térmica concentrada y termo solar en sistemas aislados y conectados a la red eléctrica de distribución con o sin almacenamiento eléctrico.

Otro punto importante es que todas las actividades, obras, proyectos o instalaciones destinados a generar electricidad que utilicen acumuladores para el almacenamiento de energía, deberán cumplir con lo establecido en el Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos.

Grupo A: Actividades, obras o proyectos con bajo potencial de impacto ambiental. No requieren presentar documentación ambiental.

El titular o titulares de las actividades, obras o proyectos que entren en este grupo, previamente deberán obtener el permiso de la autoridad competente.

Los proyectos y actividades de este grupo poseen las siguientes características:

- Aprovechamiento térmico de la energía solar para intercambio de calor en edificaciones existentes.

- Instalación de paneles solares fotovoltaicos u otros dispositivos para captar la energía solar hasta 100 kW en edificios existentes tales como viviendas, condominios multifamiliares horizontales o en altura, centros comerciales, educativos, etc. Estos sistemas aplican para autoconsumo y conectados a la red.

Grupo B: Actividades, obras o proyectos con moderado potencial de impacto ambiental. No requieren elaborar estudio de impacto ambiental.

Categoría 1:

Esta categoría corresponde a las actividades, obras o proyectos con leve potencial impacto ambiental. La resolución siempre la emitirá el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), si el proyecto requiere o no elaborar el estudio de impacto ambiental si es este último caso, se debe completar el formulario ambiental con la información que se solicite.

Categoría 2:

Dentro de esta categoría entran las actividades, obras o proyectos con un alto potencial de impacto ambiental. Se deberá presentar un estudio de impacto ambiental en el MARN y este emitirá una resolución determinando que se requiere dicho estudio para lo cual se anexaran los térmicos de referencia.

Tabla 4 Categorización para actividades, obras o proyectos destinados a la generación de energía eléctrica a base del aprovechamiento de la energía solar.

Criterios	Grupo B	
	Categoría 1	Categoría 2
Área para utilizar	Hasta 5 Hectáreas (Ha)	Mayor de 5 hectáreas (Ha)
Cobertura vegetal	Pastizales, cañales y otras áreas abiertas con cobertura vegetal arbustiva y/o arbórea, hasta 10 árboles/ Ha, con DAP igual o mayor de 20 cm.	Cobertura vegetal arbórea, mayor de 10 árboles/Ha con DAP igual o mayor de 20 cm.
Clase de generación	Fotovoltaica o termo solar	Fotovoltaica, termo solar, térmica concentrada
Topografía	Pendiente promedio hasta del 15%	Pendiente promedio mayor del 15%
Localización	Fuera de áreas naturales protegidas, sus zonas de amortiguamiento y áreas de recarga acuífera.	Dentro de áreas naturales protegidas, sus zonas de amortiguamiento, áreas de recarga acuífera y en zona costero-marina
Capacidad de generación	De más de 100 kW hasta 5MW	Mayor de 5 MW
Generación de desechos	Si se conectan a la red, no hay generación de desechos. Si hay almacenamiento de energía, se utilizan acumuladores requiriendo un manejo ambiental adecuado.	Si se conectan a la red, no hay generación de desechos. Si hay almacenamiento de energía, se utilizan acumuladores requiriendo un manejo ambiental adecuado
Amenaza natural	Las amenazas naturales se han valorado como con un Grado de Amenazas Moderado (A2).	Las Amenazas se han valorado por un Grado Alto (A3) o Muy Alto (A4) por lo que es necesario análisis detallado de las amenazas y presentar medidas de prevención, preparación y/o atención a la

Criterios	Grupo B	
	Categoría 1	Categoría 2
		emergencia en el caso de producirse el evento esperado

Fuente: (MARN, 2012)

- **Permiso medioambiental.**

Entiéndase por permiso ambiental el activo administrativo por medio del cual el Ministerio de Medio Ambiente a solicitud del titular de una actividad, obra o proyecto, autoriza que estas se realicen, sujetas a cumplimiento con las condiciones que este acto establezca (MARN, 2017).

La Ley de Medio Ambiente sostiene en su artículo 65 que el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, deberá asegurar la sostenibilidad de este, su cantidad y calidad, protegiendo adecuadamente los ecosistemas a que pertenezcan (MARN, 2007).

Pasos para obtener el permiso medioambiental:

Paso 1: Presentar formulario ambiental.

De acuerdo con el artículo 22 de la Ley de Medio Ambiente, el titular de obra, actividad o proyecto deberá presentar preliminarmente el formulario ambiental y posterior a ello el MARN realizará una evaluación para categorizar la actividad, obra o proyecto de acuerdo con su envergadura y a la naturaleza del impacto potencial. (MARN, 2007)

Según el artículo 21 del reglamento general de medio ambiente establece los requisitos mínimos del formulario ambiental, son los siguientes:

- a. Información del titular que propone la actividad, obra o proyecto;
- b. Identificación, ubicación y descripción de la actividad, obra o proyecto;
- c. Aspectos de los medios físico, biológico, socioeconómico y cultural, que podrían ser afectados;

- d. Identificación y priorización preliminar de impactos potenciales, posibles riesgos y contingencias y estimación de las medidas ambientales correspondientes; y
- e. Declaración jurada sobre la responsabilidad del titular en la veracidad de la información proporcionada. (MARN, 2007)

Paso 2: Obtener el permiso ambiental.

Si posterior a la evaluación del MARN determina que el proyecto tendrá un potencial impacto, moderado a alto, en el medio ambiente (categoría 2, Grupo B); el titular del proyecto deberá presentar el estudio de impacto ambiental que deberá tener los siguientes requisitos según el Art.23 del reglamento general de medio ambiente:

- a. Título y autores;
- b. Resumen ejecutivo del estudio;
- c. Descripción del proyecto y sus alternativas;
- d. Consideraciones jurídicas y de normativa ambiental aplicables, relativas a la actividad, la obra o el proyecto;
- e. Descripción, caracterización y cuantificación del medio ambiente actual, de los componentes físicos, biológicos y socioeconómicos, del sitio y área de influencia;
- f. Identificación, priorización, predicción y cuantificación de los impactos ambientales;
- g. Interpretación de los resultados del análisis beneficio-costos, rentabilidad y eficiencia, considerando factores técnicos, económicos, sociales y ambientales (aplicables a actividades, obras o proyectos del sector público);
- h. Programa de Manejo Ambiental;
- i. Apéndice: Mapas, métodos de evaluación utilizados, estudios técnicos, tablas, gráficos, relatoría de las Consultas Públicas realizadas a iniciativa del titular, además del estudio de riesgo, si procede.

Los pasos generales para obtener el Permiso Ambiental son (MARN, 2007)

- a. Preparar y presentar el Formulario Ambiental
- b. Subsanan observaciones

- c. Recibir resolución
- d. Preparar y elaborar el Estudio de Impacto Ambiental.
- e. Publicación en prensa sobre la consulta pública
- f. Respuesta a observaciones
- g. Presentación de la fianza de cumplimiento ambiental
- h. Recibe resolución de Permiso Ambiental

- **Emisión del permiso ambiental.**

Por último, el reglamento general de medio ambiente en su Art.34 y Art.35, menciona que de ser aprobado el estudio de impacto ambiental se emitirá el dictamen técnico favorable el cual se notificará al titular del proyecto, obra o actividad. Es importante tener en cuenta que para obtener el permiso además se deberá rendir la fianza de cumplimiento ambiental que según el Art.29 equivale a un monto equivalente a los costos totales de las obras físicas o inversiones que se requieran para cumplir con el manejo y adecuación ambiental y el periodo de validez de la fianza comprende hasta que el proyecto, obras o actividades se hayan realizado en la forma previamente establecida. (MARN, 2007)

4.2.2 Leyes aplicables para el uso de suelos para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica.

4.2.2.1 Ley de Ordenamiento y Desarrollo Territorial.

Esta ley entró en vigor el julio de 2012 y tiene por objeto el establecer las disposiciones que regirán los procesos de ordenamiento y desarrollo territorial y por finalidad fortalecer la capacidad institucional del Estado para ordenar el uso del territorio (Decreto N°644 Asamblea Legislativa)

El ámbito de aplicación del ordenamiento y desarrollo territorial comprende:

1. La utilización del suelo según su vocación.
2. La conectividad territorial y la conexión de los servicios básicos en los asentamientos humanos.

3. La protección y conservación de los recursos naturales.
4. La protección y conservación del patrimonio cultural y arqueológico.

4.2.2.2 Ley de Áreas Naturales Protegidas.

Esta ley tiene por objeto regular el establecimiento del régimen legal, administración, manejo e incremento de las Áreas Naturales Protegidas, con el fin de conservar la diversidad biológica y garantizar la perpetuidad de los sistemas naturales para beneficio de la población. La ley entró en vigor en febrero 2005. (Decreto N°579 Asamblea Legislativa).

4.3 Reglamentos o procedimientos legales usados para la disposición final de módulos fotovoltaicos.

El Salvador cuenta con un marco legal para el tratamiento de desechos sólidos ya sean estos catalogados como comunes o peligrosos, pero no cuenta específicamente con un reglamento legal para la disposición final de módulos fotovoltaicos, sin embargo, se tiene un marco normativo donde se le pide a un proyecto de generación de energía eléctrica de tecnología solar fotovoltaica la aplicación de medidas de control y gestión de desechos sólidos en las distintas etapas del desarrollo del proyecto.

En ese sentido, a continuación, se abordaron las distintas leyes de medio ambiente que involucren de una forma directa o indirecta la gestión de desechos sólidos o la disposición final de residuos producto del desarrollo de este tipo de proyectos.

4.3.1 Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos

En el decreto ejecutivo N°42, a partir del 2000 se implementó un reglamento especial sobre el manejo integral de los desechos sólidos cuyo principal objetivo es regular el manejo de los desechos sólidos de origen domiciliario, comercial y de servicios institucionales ya sea su origen de la limpieza de áreas públicas o industriales y domiciliarias, también se incluyeron los sólidos sanitarios que no sean peligrosos (MARN, 2017)

El articulado del reglamento más importante se detalla a continuación:

- Especificación de almacenamiento temporal (Arts. 5 y 6)
- Recolección y transporte (Arts. 8 y 9)
- Estaciones de transferencia. (Art. 10)
- Tratamiento y aprovechamiento desechos sólidos (Art. 11)
- Tratamiento de desechos sólidos (compostaje, recuperación: reutilización, el reciclaje y aquellos específicos que prevengan y reduzcan el deterioro ambiental y que faciliten el manejo integral)
- Disposición final: relleno sanitario (Arts. 12- 19)
- **Artículo 1.** “Tiene por objeto regular el manejo de los desechos sólidos. El alcance de este será el manejo de los desechos sólidos de origen domiciliario, comercial, de servicios o institucional; sean procedentes de la limpieza de áreas públicas, o industriales similares a domiciliarios, y de los desechos sanitarios que no sean peligrosos”.
- **Artículo 11.** “La utilización del sistema de tratamientos de desechos sólidos en el país, dependerá fundamentalmente de la naturaleza y la composición de los desechos...se identifican los siguientes sistemas de tratamiento”:
- **Recuperación, que incluye la reutilización y reciclaje:** aquellos específicos que prevengan y reduzcan el deterioro ambiental y que faciliten el manejo integral de los desechos. (MARN, 2017)

4.3.2 Programa de manejo ambiental.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha establecido en el acuerdo 94, términos de referencia (TDR) para el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica de acuerdo con su fuente de aprovechamiento, entre esas fuentes se encuentra el recurso solar.

Estos términos y referencias se elaboraron para dar cumplimiento a lo establecido en el Art.9 de las reformas del reglamento general de la ley de medio ambiente: “El formulario ambiental y el Estudio de Impacto Ambiental podrán presentarse

simultáneamente, siempre y cuando se refiera a una actividad, obra o proyecto que por sus características, según la categorización, previamente se tenga la certeza que debe presentar un estudio de impacto ambiental y además, que el ministerio haya publicado los términos de referencia tipo que se deben usar para la elaboración de dicho estudio” (Acuerdo 94, Asamblea Legislativa).

Así también, para dar cumplimiento al Art.20 de la Ley del Medio Ambiente, en lo relativo al permiso ambiental de Ubicación y Construcción y, al Permiso de Manejo Ambiental, deberá presentar por separado lo que corresponde a las etapas de Construcción y Funcionamiento.

El Programa de Manejo Ambiental, contiene todas las medidas de prevención, atenuación y compensación por cada uno de los impactos generados por el desarrollo de proyectos. En el acuerdo N°94, se establece que el Programa de Manejo Ambiental debe contener medidas en cada una de las etapas del proyecto: preparación del sitio, construcción, funcionamiento (operación) y cierre. Particularmente los TDR exigen al proyecto dar medidas para el manejo de desechos sólidos en las distintas etapas haciendo énfasis en el cierre del proyecto donde se menciona que, en el Estudio de Impacto Ambiental, se debe de contener las acciones de descontaminación y manejo de los residuos comunes y peligrosos incorporados dentro de los componentes, así como las acciones de restauración ambiental del área de las instalaciones y rehabilitación de los suelos.

4.4 Análisis de estado actual de aplicación de disposiciones de ley y normativo de generadores solares fotovoltaicos en El Salvador.

Para conocer el estado actual de la aplicación de la ley en el ámbito específico de disposición final de desechos de paneles fotovoltaicos se usará como herramienta los Programas de Manejo Ambiental (PMA) que elaboraron los distintos proyectos de generación solar fotovoltaica y, además, fueron aprobados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tomando en cuenta que se mencionó en el apartado 4.2 que el PMA contempla las medidas de prevención, atenuación y

compensación por cada uno de los impactos generados en el desarrollo del proyecto, esto incluye las etapas de construcción, funcionamiento y cierre.

En la etapa de cierre y funcionamiento es donde se espera que existan desechos de paneles fotovoltaicos debido a las fallas descritas en el apartado 3.2 o por el fin de su vida útil.

Tabla 5 Resumen de proyectos muestreados.

Ídem.	Proyecto	Ubicación	Módulos instalados	Capacidad (MWp)	Tipo de instalación
1	Cuscatlán Solar	Santa Ana	30,753	14.15	Suelo
2	Planta San Sebastián Salitrillo	Santa Ana	43,200	14.26	Suelo
3	Aeropuerto Internacional ES	La Paz	-	6.32	Suelo
4	Armenia Solar I	Armenia	20,400	6.94	Suelo
5	Armenia Solar II	Armenia	31,460	10.00	Suelo
6	Albireo I y II	Usulután	412,548	140.27	Suelo
7	Eco Solar	La Paz	37,440	12.25	Suelo
8	Ilopango Solar	Soyapango	8,208	4.10	Suelo
9	San Isidro	Cabañas	20,280	6.55	Suelo
10	Aurinko II	La Libertad	15,840	6.49	Suelo

Fuente: PMA proyectos, MARN.

4.4.1 Estudio de aplicación del reciclaje o disposición final de módulos fotovoltaicos.

De acuerdo con los proyectos descritos en la tabla 4 y a partir al PMA presentado por el titular del proyecto y aprobados por el MARN se extrajo la medida de mitigación para la actividad de gestión/disposición de residuos de desechos sólidos

ya sean estos comunes o generados por los módulos fotovoltaicos en las distintas etapas de vida del proyecto.

Como resultado se tiene que de los 10 proyectos muestreados apenas 1 plasmó en su PMA una medida concreta para la disposición final de los módulos fotovoltaicos; 3 proyectos establecieron como medida el almacenaje provisional mientras se define el tipo de manejo que se le iba a dar a los residuos de los módulos fotovoltaicos en su etapa de operación y cierre; 1 proyecto menciona que la metodología de disposición final se realizará durante el periodo de funcionamiento; los 5 proyectos restantes no han estipulado medidas para mitigar el impacto por la generación de residuos producto de módulos fotovoltaicos.

Dentro de los proyectos que contemplan dentro de su gestión el almacenaje adecuado de residuos producto de módulos fotovoltaicos, se identificó que en tres de ellos fue impuesta la medida de mitigación por el MARN ya que en el programa de manejo ambiental no habían sido contemplado el impacto.

Tabla 6 Medidas de mitigación de residuos de proyectos en sus diferentes etapas.

Ítem.	Proyecto	Etapas	Actividad del proyecto	Descripción de medida de mitigación
1	Cuscatlán Solar	Operación	Disposición final de desechos: paneles fotovoltaicos	A definir cuando finalice el periodo de operación
2	Planta San Sebastián Salitrillo	Operación	Disposición final de desechos: solo se han considerado desechos comunes y peligrosos.	Se plantea que será la empresa Geocycle la encargada de dar disposición final.
3	Aeropuerto Internacional ES	Operación/ Cierre	Disposición final de desechos: solo se han considerado desechos comunes	Se propone que será la alcaldía municipal la encargada de dar

Ítem.	Proyecto	Etapas	Actividad del proyecto	Descripción de medida de mitigación
				disposición final a los desechos.
4	Armenia Solar II	Construcción	Gestión de desechos: paneles fotovoltaicos	El MARN estableció que estos residuos debían de contar con manejo especial
5	Armenia Solar I	Construcción/ funcionamiento	Gestión de desechos: paneles fotovoltaicos	El MARN estableció que estos residuos debían de contar con manejo especial
6	Albireo I y II	Operación	Gestión de desechos: paneles fotovoltaicos	Se ha considerado el acopio de desechos de paneles fotovoltaicos dañados.
7	Eco Solar	Operación	Disposición final de desechos: solo se han considerado desechos comunes	Se dispondrá de recipientes adecuados para el almacenaje provisional.
8	Ilopango Solar	Operación/cierre	Disposición final de desechos: paneles fotovoltaicos	Separación de materiales del panel y disposición final del Silicio (Si) usando quema en horno (Holcim)
9	San Isidro	Construcción/ Operación	Gestión de desechos: paneles fotovoltaicos	El MARN estableció que estos residuos debían de contar con manejo especial y dispuestos en sitios con permiso ambiental.

Ítem.	Proyecto	Etapas	Actividad del proyecto	Descripción de medida de mitigación
10	Aurinko II	Operación/ Cierre	Disposición final de desechos: paneles fotovoltaicos	Almacenaje provisional mientras se realiza un convenio con una empresa autorizada de reciclaje.

Fuente: PMA, MARN.

4.5 Políticas de Regulación, disposición final y reciclaje en otros países.

4.5.1 Antecedentes.

Desde finales de la década de 1990, la UE ha liderado el despliegue de energía fotovoltaica con volúmenes significativos instalados entre 2005 y 2011, lo que resultó en un aumento de 2.3 GW a 52 GW durante este período. Los aumentos resultantes en la producción fotovoltaica han estimulado el desarrollo de la tecnología de reciclaje fotovoltaico, ya que el reciclaje de chatarra de producción proporciona beneficios económicos directos y justifica inversiones en este tipo de tecnologías a corto plazo. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Esto ha hecho que sea muy difícil implementar iniciativas voluntarias para la responsabilidad del productor a largo plazo. Provocó la necesidad de una regulación para garantizar la igualdad de condiciones para todos los participantes del mercado y asegurar la recolección y el reciclaje a largo plazo al final de su vida útil para los residuos fotovoltaicos (Comisión Europea, 2014). (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

4.5.2 Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)

El equilibrio entre las ventajas y desventajas de los diferentes enfoques para la gestión de residuos electrónicos, incluidos los residuos de paneles fotovoltaicos, está en el centro del marco normativo de la UE establecido por la Directiva RAEE. Este marco aborda de forma eficaz el complejo flujo de residuos AEE11 en los 28 Estados miembros de la UE y en el área económica más amplia, colocando el

principio de responsabilidad ampliada del productor en su centro. La directiva tiene un impacto global ya que los productores que desean colocar productos en el mercado de la Unión Europea son legalmente responsables de la disposición final, sin importar donde se encuentren sus sitios de fabricación. La Directiva RAEE original entró en vigor en febrero de 2003, pero resultó insuficiente para hacer frente al flujo de residuos diverso y en rápido crecimiento. En 2012, siguiendo una propuesta de la Comisión Europea, se revisó la directiva. Según el nuevo enfoque de la comisión los productores son responsables de los costes de recogida, tratamiento y seguimiento de los residuos de paneles fotovoltaicos. Además, tienen una serie de responsabilidades como son (IRENA & IEA-PVPS, 2016):

1. **Responsabilidad financiera:** Los productores son responsables a través de una garantía financiera de cubrir el costo de recolección y reciclaje de los productos que puedan ser utilizados por los hogares. Son los encargados de financiar los puntos públicos de recogida y las instalaciones de tratamiento de primer nivel. (IRENA & IEA-PVPS, 2016)
2. **Responsabilidad de informar:** los productores deben informar en un periodo mensual o anual sobre los paneles vendidos, retirados y enviados para su tratamiento. El informe debe de incluir los resultados del tratamiento de residuos de productos como lo son: toneladas tratadas, toneladas recuperadas, toneladas eliminadas de los distintos materiales del panel fotovoltaico (vidrio, residuos plásticos mezclados, metales, etc.) (IRENA & IEA-PVPS, 2016)
3. **Responsabilidad de la información:** los productores son responsables de etiquetar los paneles de conformidad a lo que establece la directiva WEEE. Además, deben informar a los compradores que los paneles deben desecharse en instalaciones de almacenamiento dedicadas y no deben mezclarse con los residuos generales y, sobre todo, que el servicio de recogida y el reciclaje es gratuito. Por último, los productores son responsables de informar al comprador el procedimiento de disposición final del panel fotovoltaico, la manipulación durante el almacenamiento, desmontaje y tratamiento (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

4.5.2.1 Objetivos de la Directiva WEEE

La Directiva WEEE, tiene un enfoque escalonado de los objetivos de recolección y recuperación descritos a continuación:

Tabla 7 Objetivos anuales de recolección y recuperación (% en masa) en virtud de la Directiva WEEE.

	Objetivos anuales de recolección	Objetivos anuales de reciclaje/recuperación
Directiva WEEE original (2002/96/CE)	4 kg/habitante	75% recolectado, 65% reciclado.
Directiva WEEE revisada (2012/19/UE) hasta 2016	4 kg/habitante	Comenzó con 75 % de recolección, 65 % de reciclaje, 5 % de aumento después de 3 años
Directiva WEEE revisada (2012/19/UE) de 2016 a 2018	45% (en masa) de todos los equipos puestos en el mercado	80% recolectado y 70% preparado para reutilización y reciclado
Directiva WEEE revisada (2012/19/UE) de 2018 y más allá.	65% (en masa) de todos los equipos puestos en el mercado o 85% de los residuos generados.	85% recolectado y 80% preparado para reutilización y reciclado

Fuente: (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

Las próximas revisiones de la Directiva WEEE podría imponer procesos de recuperación y reciclaje más rentables, mayor calidad y alto rendimiento a medida estén disponibles. El término “reciclado” se refiere al deterioro del material o la energía de una materia prima secundaria al utilizarla para nuevos fines. (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

La Directiva WEEE establece los requisitos mínimos que los estados miembros de la UE pueden ajustar cuando trasponen la directiva a su propia legislación. Pueden, por ejemplo, definir los requisitos más estrictos o cuotas objetivos y agregar

requisitos. Dado que la directiva se ha transpuesto muy recientemente, no hay datos estadísticos disponibles sobre la recolección y reciclaje de sistemas fotovoltaicos. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

A continuación, se analiza los enfoques actuales para la gestión de residuos fotovoltaicos, específicamente, como se aplica la regulación fotovoltaica en los países como Alemania, Reino Unido, Japón y Estados Unidos. Así también, se abordará un estudio de casos en China e India por ser productores y por tener un alto crecimiento en el mercado a nivel mundial.

4.5.3 Alemania.

4.5.3.1 Proyección de residuos y mercado fotovoltaico.

El mercado fotovoltaico alemán comenzó a crecer en la década de los 90's. En esa década se introdujeron los primeros esquemas de apoyo, dirigidos al uso residencial en techos. A principios de la década de 2000, ese programa de apoyo a la energía fotovoltaica en techos se amplió a 100,000 techos y como producto condujo a la ley de energías renovables, la primera en su tipo. Además, se estableció la tarifa para la electricidad generada a partir de energía renovable, incluida la fotovoltaica. En 2015, la energía fotovoltaica contribuyó con el 6% del consumo eléctrico neto total en Alemania, con una capacidad instalada de 40 GW. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Alemania fue el mercado fotovoltaico más grande del mundo durante dos décadas consecutivas. Solo en 2015 fue superado por China para convertirse hoy en día en el segundo mercado fotovoltaico más grande. Se proyecta que Alemania tendrá un volumen que oscilará entre 3,500 toneladas y 70,000 toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil para el 2016. En 2030 y 2050, se estima que el escenario de pérdidas regulares será de 400,000 toneladas y 1,000,000 toneladas y para pérdidas tempranas será de 4,3 a 4,4 millones. Esto posiciona a Alemania como uno de los primeros y más grandes mercados para las tecnologías de reciclaje para los próximos años. (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

4.5.3.2 Marcos regulatorios y no regulatorios

- **Regulación nacional.**

La Directiva WEEE de la Unión Europea revisada, se incorporó a la legislación alemana en octubre de 2015 a través de una revisión de ley de equipos eléctricos y electrónicos. Por lo que, los nuevos requisitos para la gestión del reciclaje de paneles fotovoltaicos entraron en vigor desde esa fecha.

En Alemania, se creó una entidad encargada del registro de productores de desechos electrónicos, coordina el suministro de contenedores y recogida en öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE, autoridades de eliminación de residuos). La Stiftung EAR no es la responsable de las tareas operativas como la recolección, clasificación, desmantelamiento, reciclaje o eliminación de desechos electrónicos. La responsabilidad de estas funciones siempre recae en los productores, vigente desde 2005 en la ley de equipos eléctricos y electrónicos (ElektroG) (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.3.3 Implementación de la Directiva WEEE.

De acuerdo con la nueva Directiva WEEE transpuesta en 2015, Alemania ha aprobado disposiciones específicas para la recolección, recuperación y reciclaje de paneles fotovoltaicos descrita en la tabla 8 en dichas disposiciones se establecen el monto de la garantía financiera que cualquier productor debe proporcionar por cada nuevo panel vendido. (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

Tabla 8 Parámetros alemanes para el cálculo de garantía de módulos FV.

Categoría	Equipos de consumo y paneles fotovoltaicos
Tipo de aparato	Paneles fotovoltaicos para uso en hogares privados
Tasa de retorno supuesta	30%
Esperanza media de vida supuesta	20 años
Esperanza máxima de vida supuesta	40 años
Costo por disposición	200 EUR/ton

Fuente: (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

Si el productor elige el esquema de responsabilidad solidaria para los paneles B2C vendidos, la compensación se calcula de la siguiente manera:

Costo de responsabilidad

= *Importe básico para el registro (toneladas de paneles fotovoltaicos puestos en el mercado)*
× *tasa de devolución supuesta (%)* × *costes de eliminación* ($\frac{\text{€}}{\text{toneladas}}$)

Para paneles fotovoltaicos B2B, el regulador alemán permite acuerdos contractuales entre el productor y el propietario, por ejemplo, para cumplir con los requisitos legales a través de acuerdos de servicio de reciclaje. Alemania ha establecido una categoría de recolección distinta para los paneles fotovoltaicos y, además, proporciona recolección y tratamiento separados entre paneles y otros desechos en puntos de recolección municipales. Esto quiere decir que cualquier propietario de un panel fotovoltaico que desee desecharlo puede llevarlo a un punto de acopio municipal, donde será aceptado de forma gratuita esto último aplica para usuario residenciales, sin embargo, se espera que la mayoría de los paneles fuera de uso sean retirados bajo el esquema B2B o a través de los sistemas de recolección y reciclaje propiedad de los fabricantes (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

- **Transacciones de empresa a consumidor (B2C).**

La nueva Ley de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (ElektroG), obliga a los productores que venden desechos electrónicos a hogares privados o usuarios que no sean hogares privados, pero con una demanda similar a cumplir con las obligaciones asociadas al final de la vida presente y futura. Esto garantiza que los productores se ocupen de la gestión final de la vida útil de los paneles fotovoltaicos vendidos a hogares privados. El sistema de cumplimiento colectivo de productores establece dos niveles de operación y financiamiento (IRENA & IEA-PVPS, 2016):

Nivel 1: cubre la operación del sistema de recolección y los costos relacionados con la recolección y el reciclaje de productos. Los costos se cubren mediante un sistema PAYG (pago por uso) para los participantes del mercado que ponen productos de una determinada categoría (paneles fotovoltaicos) en el mercado de transacciones B2C (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Nivel 2: garantiza que haya suficiente recolección y reciclaje de productos puestos en el mercado. Los costos que forman la base de financiación del nivel 2 son uniformes para la categoría de equipos fotovoltaicos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Los fabricantes/productores deben registrarse en una cámara de compensación antes que se le permita el acceso al mercado. Luego, deben declarar que han llegado a un acuerdo para cubrir los costos de Nivel 2 para productores B2C colocados en el mercado. La cámara de compensación proporciona un número de registro de productor de desechos electrónicos que debe imprimirse en el producto y las facturas (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

- **Transacciones de empresa a empresa (B2B).**

La nueva Ley de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (ElektroG), da una forma diferente de financiar las obligaciones de los sistemas fotovoltaicos al final de su vida útil para los productores que venden en una base B2B solo debido a las cantidades, tamaño, el nivel de complejidad, etc. El enfoque B2B incluye la flexibilidad para acordar un mecanismo de financiamiento. Para las plantas fotovoltaicas de gran escala, lo más probable es que esto resulte en modelos que generen fondos para la recolección y el reciclaje a partir de flujos de efectivo de proyectos casi comerciales al final de su vida útil. En consecuencia, se proporcionará una financiación muy rentable que permita a los socios contractuales cumplir con las obligaciones de fin de vida previamente acordadas. De esta manera se cubrirán los volúmenes históricos de residuos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.4 Reino Unido.

4.5.4.1 Proyección de residuos y mercado fotovoltaico.

El Reino Unido es un mercado relativamente joven para la energía fotovoltaica, sin embargo, recientemente experimentó un rápido aumento de poco menos de 1 GW

en 2011 a más de 9 GW en 2015 y ahora más de 750,000 instalaciones (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

En cuanto a los volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, se tiene un crecimiento exponencial. Según los últimos registros y con un modelo de crecimiento, se prevé que para el año 2030 el volumen de los residuos producto de fallas tempranas y regulares esté en un rango de 30,000 toneladas y 200,000 toneladas, incluso se estima que esta cifra puede incrementar y llegar de 1 a 1.2 millones de toneladas para el año 2050. (IRENA & IEA-PVPS, 2016)

4.5.4.2 Marcos regulatorios y no regulatorios.

Debido a que el mercado fotovoltaico de Reino Unido es aún joven, el tratamiento y reciclaje se ve reflejado en la implementación de la Directiva WEEE fundada en enero 2014. Antes de la Directiva WEEE tenía iniciativas voluntarias de fabricantes y por sistemas de recolección y reciclaje siempre de fabricantes de paneles fotovoltaicos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Reino Unido ha establecido algunas reglas específicas cuando se define un productor fotovoltaico y, por lo tanto, el principio de responsabilidad extendida del productor. Un productor según la legislación se define de la siguiente manera (IRENA & IEA-PVPS, 2016):

- Fabricante del Reino Unido que vende paneles fotovoltaicos bajo su propia marca.
- Importador de paneles fotovoltaicos en el mercado Reino Unido.
- Empresa del Reino Unido que vende paneles fotovoltaicos fabricados o importados por otra persona bajo su propia marca.

La Directiva WEEE influye en el financiamiento que buscan los fabricantes cuando se trata de ventas para mercados domésticos (B2C) y no domésticos (B2B) al imponer requisitos (IRENA & IEA-PVPS, 2016):

- Los productores fotovoltaicos están obligados a financiar la recolección de paneles fotovoltaicos domésticos sobre la base de la cuota de mercado. Por ejemplo: un productor coloca el 10% (en peso) de paneles nuevos en el

mercado del Reino Unido en un año determinado paga por la recolección y el tratamiento del 10% de los paneles fuera de uso recolectados el año siguiente.

- Los productores fotovoltaicos deben financiar la recolección y el reciclaje de los paneles no domésticos (B2B) que lleven el símbolo del cubo de basura, así como los que no lo tengan, si dichos paneles se reemplazan al mismo tiempo por otros nuevos.

Existe otro requisito imputado a los instaladores con el fin que se unan a un esquema de recuperación del distribuidor.

4.5.4.3 Perspectivas para Reino Unido.

El mercado de reciclaje de paneles fotovoltaicos de Reino Unido probablemente seguirá siendo menor durante 2017 y 2018. Pero la dinámica de precios y un fuerte enfoque político en la energía fotovoltaica integrada en edificios (BIPV) podría motivar nuevos desarrollos tecnológicos para reciclar componentes BIPV (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.5 Japón.

El mercado fotovoltaico japonés tiene varios de los principales fabricantes del mundo, por ejemplo, Sharp, Kyocera y Panasonic. La capacidad fotovoltaica instalada acumulada de Japón subió a más de 6.7 GW en 2012 a 34.3 GW en 2015 (IRENA, 2016b; IEA-PVPS, 2014b e IEA-PVPS, 2015). Según estimaciones los residuos acumulados de paneles fotovoltaicos podrían ascender a un rango de 7,000-35,000 toneladas para 2016 y para 2030 podría aumentar entre 200,000 y 1 millón de toneladas. Para 2050 se estima que podría llegar a 6.5-7.6 millones de toneladas según el informe de IRENA & IEA-PVPS, 2016. Por otro, las estimaciones del Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) y el Ministerio del Medio Ambiente (MOE) son más bajas, por ejemplo, el volumen de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil llegará a aproximadamente 2,808 toneladas para las 2020 y 9,580 toneladas para 2025 y 28,000 toneladas después de 2030 lo que lleva a 61,000 toneladas en 2035 y finalmente a 775,000 toneladas en 2039. Estas estimaciones asumen 25 años de vida útil y 0.3% daños por fallas en los paneles

instalados cada año. La diferencia entre la estimación de IRENA y la de las autoridades de Japón radica principalmente en la metodología utilizada, ya que IRENA incluye fallas tempranas cubiertas a través de reemplazo de garantía y no se incorpora completamente en las predicciones de volumen al final de la vida útil del METI/MOE (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.5.1 Marcos regulatorios y no regulatorios

Japón no tiene regulaciones específicas para los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, que por lo tanto deben ser tratados bajo el marco regulatorio general para la gestión de residuos: La Ley de Gestión de Residuos y Limpieza Pública (METI y MOE, 2015). La Ley define los residuos, las responsabilidades del generador y el manipulador de residuos industriales, incluida la eliminación de vertederos, etc. Además, La Ley de Reciclaje de Residuos de Construcción (METI y MOE, 2015) prescribe como gestionar los residuos de construcción y desmantelamiento. La ley obliga a la recuperación y reciclaje de hormigón, madera y materiales de construcción (que contengan hormigón, hierro y asfalto). Aunque los paneles fotovoltaicos no están específicamente identificados en la ley, los paneles fotovoltaicos integrados con material de construcción pueden requerir reciclaje, según las interpretaciones actuales. Los paneles en plantas fotovoltaicas montadas en el suelo no se ven afectados por esta regulación. Sin embargo, los componentes del sistema hechos de hormigón o hierro también estarían sujetos a la ley. Una enmienda propuesta al esquema de tarifas de alimentación de Japón para la electricidad renovable incluye la consideración de la gestión del final de la vida útil con reciclaje, pero sin obligaciones ni sanciones (METI, 2015). Desde 2013, METI y MOE han evaluado conjuntamente cómo manejar equipos de energía renovable al final de su vida útil, como PV, calentadores de agua solares y turbinas eólicas. Un informe de junio de 2015 produjo una hoja de ruta para promover un esquema de recolección, reciclaje y tratamiento adecuado. También abarcó la promoción de la I+D tecnológica, los diseños respetuosos con el medio ambiente, las directrices para el desmontaje, el transporte y el tratamiento, y la publicidad a los usuarios (METI, 2015 y METI y MOE, 2015) (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Sobre la base de esta hoja de ruta, en abril de 2016 se publicó la primera edición de las directrices para promover el tratamiento adecuado al final de la vida útil, incluido el reciclaje (METI y MOE, 2016). Las directrices van encaminadas a proveer información básica, como leyes y reglamentos sobre el desmantelamiento, transporte, reutilización, reciclaje y eliminación de desechos industriales (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

A pesar del avance en materia de reciclaje y tratamiento de desechos, Japón no cuenta aún con esquemas específicos para el tratamiento de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil, por lo que se espera que se traten como los otros desechos industriales. Se prevé que los paneles fotovoltaicos se tratarán de la siguiente manera: se retirarán de los edificios (techos) o sitios de instalación y se transportarán para el tratamiento de residuos, luego los componentes de los paneles se separan tanto como sea posible y los materiales valiosos se recuperarán y reciclarán. Para el caso de materiales difíciles de separar, recuperar y reciclar (Si) serán enviados a vertederos sujetos a la regulación y clasificación de contenido peligroso (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.6 Estados Unidos.

El mercado de Estados Unidos es uno en constante crecimiento, pero sin un reglamento específico para residuos de paneles fotovoltaicos. La proyección de residuos desde la década de 2000 ha estado creciendo rápidamente y la capacidad instalada acumulada superó los 25 GW a finales de 2015, donde los últimos 10 años el aumento de la capacidad instalada ha sido más representativa y notoria. En cuanto a los volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos producto del final de su vida útil estos se mantienen bajos. Para 2016 se espera tener 6,500 a 24,000 toneladas de residuos; en 2030, se prevén entre 170,000 y 1 millón de toneladas de residuos; y para 2050 que aumente hasta 7 veces, generando 7.5 a 10 millones de toneladas de residuos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.6.1 Marco regulatorio y no regulatorio.

Estados Unidos aún no cuenta con una ley específica que regule los residuos fotovoltaicos ni reglamentos que exijan la recolección y el reciclaje de paneles

fotovoltaicos al final de su vida útil. Hasta 2016 la gestión de residuos se lleva a cabo usando la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos que un marco legal para residuos sólidos peligrosos y no peligrosos, pero incluso esta ley no incluye requisitos específicos para paneles fotovoltaicos. Dentro de los residuos peligrosos hay dos tipos: residuos peligrosos característicos residuos peligrosos enumerados. Este último se refiere a los listados reales de tipos específicos de desechos peligrosos. Los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil no están incluidos en la lista de desechos peligrosos, por lo que, se debe evaluar utilizar el método de desechos peligrosos característicos (Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad). Esto se logra evaluando si el extracto de una muestra representativa de los desechos contiene contaminantes que exceden los niveles reglamentarios (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

En Estados Unidos los estados pueden usar procedimientos de lixiviación adicionales, por ejemplo, California con la Concentración Limite Umbral Total y la Concentración Limite Umbral Soluble para la clasificación de residuos. En la sección legislativa de California de 2014-2015, se propuso el proyecto de ley 489 del Senado. Este proyecto de ley buscaba autorizar al Departamento de Control de Sustancias Tóxicas de California a cambiar la clasificación de los paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil identificados como desechos peligrosos a desechos universales. El proyecto de ley no entrará en vigor hasta que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos autorice la adición de paneles fotovoltaicos de desechos peligrosos a una categoría de desechos universales o comunes en el programa de desechos peligrosos de California (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.6.2 *Iniciativas privadas.*

Hay varias partes interesadas en la industria fotovoltaica, estos han proporcionado servicios de recolección y reciclaje voluntarios de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. Un ejemplo, es la empresa First Solar que opera una planta de reciclaje ubicada en Ohio con una capacidad diaria de procesamiento de 30 toneladas, pero solo aceptan sus propios productos (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.7 China.

4.5.7.1 Proyección de residuos y mercado fotovoltaico.

En 2015 China instaló 15 GW de energía fotovoltaica, logrando alcanzar por segundo año consecutivo su objetivo de crecimiento anual promedio de 10 GW y manteniendo su posición como el mercado fotovoltaico más grande del mundo. Según el Plan Nacional de Energía (2016-2020) de la Administración Nacional de Energía se busca como objetivo a corto plazo instalar 150 GW fotovoltaicos para 2020. IRENA establece una proyección de flujo de residuos de paneles fotovoltaicos acumulados de 8,000 a 100,000 toneladas en 2020 y se espera que aumente entre 200,000 y 1.5 millones de toneladas para 2030 y 13.5 a 19.9 millones de toneladas hasta 2050. Por otro lado, China ha desarrollado sus propias proyecciones de residuos de paneles fotovoltaicos a través de su Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Academia Nacional de Ciencias (IEE). La IEE propone dos escenarios de casos, un escenario de negocios como de costumbre y un escenario de mejor trato. Las predicciones anuales de los dos escenarios IEE llegan a 61,250 hasta 87,000 toneladas para 2025, aumentando a 262,000 a 330,000 toneladas para 2030. A partir de 2034, los escenarios IEE muestran volúmenes al final de la vida más altos que los escenarios proyectados por IRENA con 900,000 toneladas por año y 1.1 millones de toneladas por año para 2034 (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.7.2 Marcos regulatorios y no regulatorios

En la actualidad, China no tienen requisitos específicos para el tratamiento de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. En 2011 entro vigor el Reglamento de Gestión de Reciclaje de Residuos de Productos Eléctricos y Electrónicos que exige que los desechos electrónicos se recolecten de varias maneras y se reciclen en un sistema de procesamiento centralizado. Los productores pueden recolectar y reciclar los productos por sí mismos o confiar la recolección a los vendedores, agencias de servicio posventa o recicladores de desechos electrónicos y confiar el reciclaje/eliminación a instituciones calificadas. China ha patrocinado la investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías de reciclaje fotovoltaico, específicamente en dos métodos para c-Si en el marco del Programa Nacional de I+D de alta tecnología de China, Investigación de reciclaje y eliminación segura de

fotovoltaicos de 2012 a 2015. Estos métodos se basan en el reciclaje físico o térmico. Para el método físico se espera obtener una tasa de reciclaje de alrededor del 90% en masa, pero el silicio no se puede reciclar para el uso en la industria fotovoltaica debido a su baja pureza. En el método térmico, los desechos celulares limpios pasan por un proceso térmico y luego se utilizan para experimentos químicos para reciclar silicio, plata y aluminio (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.8 India.

4.5.8.1 Proyección de residuos y mercado fotovoltaico.

Desde 2012, India ha instalado más de 1 GW de energía fotovoltaica al año, alcanzando una capacidad acumulada de casi 5 GW en 2015 (IRENA, 2016b). Esto coloca a India entre los diez principales mercados fotovoltaicos del mundo. La Misión Solar Nacional Jawaharlal Nehru (JNNSM) tiene como objetivo instalar 100 GW de sistemas fotovoltaicos conectados a la red para 2022 (Gobierno de India, 2011). El despliegue de energía fotovoltaica a gran escala se ha llevado a cabo recientemente, por lo que es posible que no se esperen grandes volúmenes de residuos fotovoltaicos a final de su vida útil hasta después de 2030. Se proyectan desechos mínimos para 2016 pero para 2030, los desechos podrían promediar 50,000 a 320,000 toneladas, alcanzando 4.4 a 7.5 millones de toneladas para 2050 (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.5.8.2 Marco regulatorio y no regulatorio.

India no tiene regulaciones que exijan la recolección, recuperación y reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. Esto quiere decir que los desechos de paneles fotovoltaicos generados están siendo gestionados por las normas generales sobre desechos. La legislación que cubre los requisitos para desechos electrónicos generales y las restricciones sobre el uso de sustancias peligrosas en productos electrónicos se incluyen en las Reglas de desechos electrónicos (gestión y manejo) de 2016 (Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático, 2016c). Sin embargo, estas reglas solo se aplican a los aparatos electrónicos domésticos y no a la energía fotovoltaica. En consecuencia, ya existe una infraestructura de reciclaje de desechos electrónicos a escala industrial en la India,

pero solo cubre los dispositivos electrónicos domésticos y no los desechos producidos por los generadores de energía fotovoltaica (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.6 Análisis comparativo de regulaciones extranjeras.

4.6.1.1 Antecedentes

Para poner en contexto el impacto de las distintas regulaciones legales o no implementadas por los distintos países es importante dimensionar el impacto de estas regulaciones en la industria. Un parámetro que sirve para evaluar las regulaciones es la proyección de residuos producto de paneles fotovoltaicos. Se espera que los países con una mayor proyección de residuos tengan regulaciones más completas y estrictas en comparación de los países con una proyección de residuos menor.

Se ha tomado la proyección de residuos producto de paneles fotovoltaicos hecha por IRENA (IRENA & IEA-PVPS, 2016) para los países mencionados en los apartados 4.5.3., 4.5.4.,4.5.5.,4.5.6.,4.5.7.,4.5.8., IRENA ha elaborado dos escenarios de pérdidas de paneles fotovoltaicos posibles: pérdida regular y pérdida temprana. Para el análisis se ha usado este último escenario por ser más drástico a comparación del primero.

Tabla 9 Volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil (millones de toneladas).

País	2016	2020	2030	2040	2050
Alemania	0.07	0.20	1.00	2.60	4.40
Reino Unido	0.00	0.02	0.20	0.60	1.50
Japón	0.04	0.10	1.00	2.50	7.50
Estados Unidos	0.02	0.09	1.00	4.00	10.00
China	0.02	0.10	1.50	7.00	19.90
India	0.00	0.02	0.33	2.30	7.50

Fuente: IRENA & IEA-PVPS, 2016

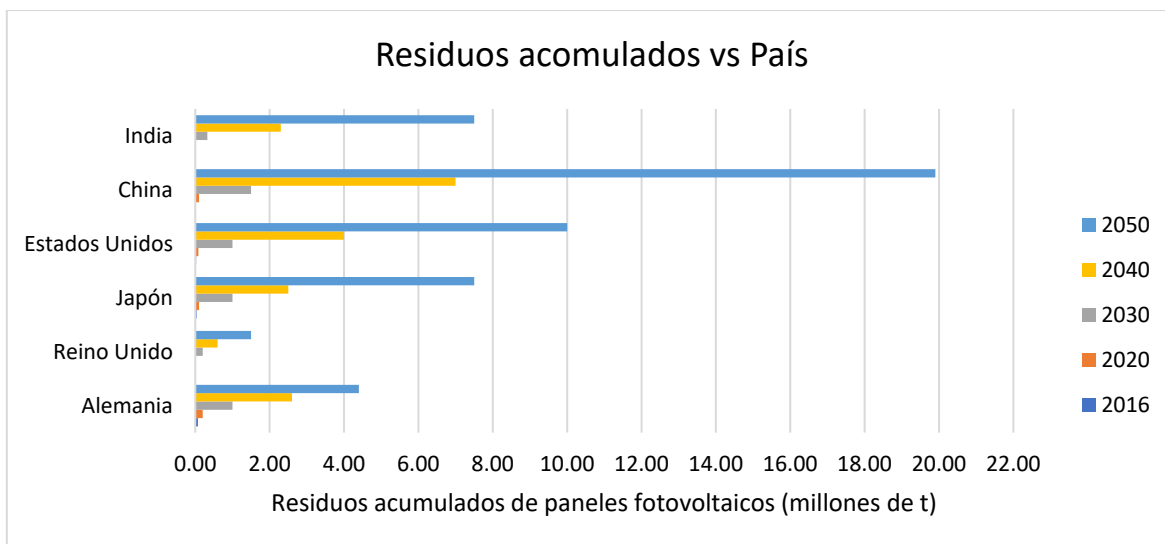


Figura 15 Volúmenes de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.

FUENTE: IRENA & IEA-PVPS, 2016

La acumulación de residuos es proporcional a la capacidad instalada que los países desarrollen en el futuro, pero también, se debe de tomar en cuenta los siguientes supuestos del escenario de pérdidas tempranas planteados por la metodología utilizada por IRENA:

- ✓ Vida útil promedio del panel de 30 años
- ✓ 99,99% de probabilidad de pérdida después de 40 años
- ✓ Inclusión de puntos de apoyo para el cálculo de regresión no lineal:
 - ✓ Daños de instalación/transporte: 0,5%
 - ✓ Dentro de los primeros 2 años: 0.5%
 - ✓ Después de 10 años: 2%
 - ✓ Después de 15 años: 4%
 - ✓ Cálculo de los parámetros de Weibull

Por ejemplo, se observa que Estados Unidos tenga una capacidad instalada 600 GW para 2050 seguido de China con 350 GW, pero la generación de residuos no es proporcional. Estados Unidos proyecta residuos acumulados de 10 millones de toneladas, mientras que China 19 millones de toneladas en el mismo periodo.

4.6.2 Resumen de políticas de regulación en otros países.

Se ha extraído de la información anterior los puntos más representativos de las distintas estrategias o regulaciones legales, que tienen los distintos países para gestionar los residuos de paneles fotovoltaicos.

Como puntos más importantes está que solo dos países de los seis estudiados en la sección 4.5.3., 4.5.4.,4.5.5., 4.5.6., 4.5.7.,4.5.8., cuentan con una regulación legal vigente para la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos como lo son Reino Unido y Alemania. Sin embargo, el mayor productor de paneles fotovoltaicos como China, no cuenta con regulación legal por otro lado tiene la fortaleza de investigación y desarrollo que podría facilitar la implementación de tecnologías que favorezcan la pronta regulación legal del reciclaje o disposición final de los residuos.

La Directiva WEEE es fundamental en la construcción de políticas públicas que apoyen la implementación de medidas en los países europeos prueba de ello son los ejemplos de Reino Unido y Alemania que poseen una gestión de residuos específica para paneles fotovoltaicos robusta y de obligatorio cumplimiento, así como su alcance involucra de manera integral las distintas entidades que participan en las etapas del ciclo de vida de un panel fotovoltaico.

Tabla 10 Resumen de políticas de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos en otros países.

País	Alemania	Reino Unido	Japón	Estados Unidos	China
Regulación específica	SI	SI	NO	NO	NO
Ley de referencia	Elektrogesetz (ElektroG)	Incorporación de medidas de control a legislación actual.	N/A	N/A	N/A
Productor/Consumidor	Productor/Consumidor	Productor/Consumidor	Productor/Consumidor	Productor/Consumidor	Productor/Consumidor
Virtudes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Posee una regulación específica. 2. Es de obligatorio cumplimiento. 3. Establece tasa de recolección a los fabricantes del 85%. 4. Establece tasas de reciclaje a los fabricantes de hasta el 80%. 5. Existe una garantía a prueba de insolvencia impuesta a los fabricantes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ha añadido medidas de gestión en la legislación actual. 2. Los productores fotovoltaicos están obligados a financiar la recogida de paneles fotovoltaicos de hogares sobre la base de la cuota de mercado. 3. Los productores fotovoltaicos deben financiar la recolección y el reciclaje de paneles no domésticos que llevan el símbolo de reciclables, o la sustitución por otros nuevos paneles 4. Creación de una categoría separada dedicada a financiar la recogida y el reciclado de paneles fotovoltaicos. Esto sirvió para abaratar los costos e incentivar a los fabricantes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. En junio de 2015 produjo una hoja de ruta para promover un plan de recogida, reciclado y tratamiento adecuado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La recolección voluntaria y el reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil han sido proporcionados por varias partes interesadas de la industria fotovoltaica. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. China ha patrocinado Investigación y Desarrollo sobre tecnologías de reciclado fotovoltaico.

País	Alemania	Reino Unido	Japón	Estados Unidos	China
Desventajas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si la recuperación de paneles para uso profesional fue comprada antes de la entrada en vigor de la Directiva WEE, es posible cargar costos a los clientes profesionales por la devolución. 		<ol style="list-style-type: none"> 1. No existen planes específicos para tratar paneles fotovoltaicos de fin de vida en Japón, por lo que se espera que se traten de la misma manera que otros desechos industriales 2. Los paneles fotovoltaicos no están específicamente identificados en la ley general de gestión de residuos industriales. 3. Los paneles en plantas fotovoltaicas montadas en el suelo no se ven afectados por la Ley de Reciclaje de Residuos de Construcción que establece la gestión de los residuos al final de la vida útil de una instalación industrial. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No existe una ley específica de desperdicios en los Estados Unidos y ninguna normativa que obligue a recolectar y reciclar paneles fotovoltaicos al final de su vida útil. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No tienen requisitos específicos para el tratamiento en su etapa final de vida.

Fuente: IRENA & IEA-PVPS, 2016

4.6.3 Alcance de las regulaciones en otros países.

El alcance de las regulaciones legales o no para la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos, pueden ser dirigidas a las siguientes entidades:

1. Productores o fabricantes.
2. Usuario final.
3. Instituciones estatales.

Las metodologías de regulación de los distintos países vistas en el apartado 4.5 enfocan sus esfuerzos de manera distinta. Se ha agrupado de la siguiente manera:

1. **Alto:** implementación de una regulación legal y de obligatorio cumplimiento extendida a productores, usuario final e instituciones estatales.
2. **Medio:** implementación de regulaciones no legales con flexibilidad de cumplimiento a productores, usuario final e instituciones estatales. Existe hoja de ruta de corto a medio plazo para la implementación de leyes de regulación de residuos.
3. **Bajo:** gestión sin regulaciones y uso de medidas voluntarias de productores, usuarios finales e instituciones estatales. No existe hoja de ruta de corto a medio plazo para la implementación de leyes de regulación de residuos.

Tabla 11 Categorización de enfoques de países.

País	Tipo de Alcance	Enfoque
Alemania	Productores/Usuario Final/Instituciones estatales	Alto
Reino Unido	Productores/Usuario Final/Instituciones estatales	Alto
Japón	Usuario Final	Medio
Estados Unidos	Productores/Usuario Final/Instituciones estatales	Medio
China	Productores/Instituciones estatales	Bajo
India	Usuario Final	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Buenas prácticas para implementar en la regulación de El Salvador.

En los apartados anteriores se abordó, desde la perspectiva de El Salvador y otros países, la gestión de residuos generados por paneles fotovoltaicos. En El Salvador se encontraron deficiencias al no tener leyes específicas para el tratamiento de este tipo de desechos por lo que se planteará a continuación propuestas generadas para la gestión, tratamiento y disposición final de los residuos de paneles fotovoltaicos compatibles con el contexto salvadoreño. Las propuestas se dividirán en tres tipos: gestión, técnica, normativa.

4.7.1 Propuesta desde la perspectiva de gestión.

En los mecanismos de gestión de los residuos se incluyen las responsabilidades de los actores que participan en cada etapa del ciclo de vida de un panel fotovoltaico.

4.7.1.1 Responsabilidades

A continuación, se proponen lineamientos para los productores o fabricantes, comercializadores o distribuidores, consumidores y el Estado.

A. Responsabilidad de los productores o fabricantes:

Se considera como productor o fabricantes las personas naturales o jurídica:

- Fabricante de paneles fotovoltaicos que comercialice sus productos en El Salvador.
- Venta paneles fotovoltaicos con fines económicos fabricados por un tercero bajo su propia marca en El Salvador.
- Importe paneles fotovoltaicos comercialmente a El Salvador.

Los productores o fabricantes de paneles fotovoltaicos deben de registrarse en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y debe de actualizar su información en un periodo de tiempo establecido. Dentro de la información proporcionada se recomienda incluir la proyección de volumen en toneladas estimada de producción anual y a comercializar en el país por año. Esta medida ya fue implementada en el Reino Unido

donde los productores de más de 5 toneladas anuales se consideran productores mayores (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Se recomienda que el productor asegure el financiamiento y la organización de la recolección, tratamiento y disposición final de los residuos generados por paneles fotovoltaicos. Los productores son responsables de la recolección de los residuos que recolectan los distribuidores, así como, de los residuos generados por sus consumidores en el caso que estos no hagan una devolución voluntaria al distribuidor.

Sistema de cumplimiento del productor.

A través de una entidad estatal competente los productores deberán unirse a un sistema de cumplimiento, homologando el sistema implementado en Reino Unido. Se plantea en un primer momento hacer esta medida obligatoria para los grandes productores y opcional para los productores menores.

La finalidad del sistema de cumplimiento del productor es facilitar al estado dar seguimiento al cumplimiento de las obligaciones de los productores en cuanto a la disposición final de residuos. Este sistema tendrá su financiamiento de una membresía anual que se utilizará para cubrir los costos de recolección y tratamiento de los residuos de paneles. La tarifa de la membresía se establecerá a partir del volumen de paneles fotovoltaicos que el productor pone en el mercado anualmente.

Se les debe de dar la facilidad a los productores de poder recolectar voluntariamente y por sus medios los residuos de paneles fotovoltaicos que fabrique con el fin de darles tratamiento y disposición final para el aprovechamiento de los materiales recuperados. Esta prestación servirá para reducir costos y consumo de materia prima. Para los casos donde el productor comercialice sus propios paneles o los paneles fabricados por un tercero bajo su propia marca, también deberán cumplir con las responsabilidades de distribuidores y comercializadores de paneles fotovoltaicos.

La creación de este sistema recae en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) como máximo ente rector de la implementación de políticas públicas referentes al cuidado y protección del medio ambiente.

B. Responsabilidades de distribuidores o comercializadores.

Se define un distribuidor o comercializador a la persona natural o jurídica que cumpla el siguiente perfil:

- Se dedique con fines comerciales a la distribución de paneles fotovoltaicos.
- Venta paneles fotovoltaicos fabricados por un tercero bajo la marca del tercero.
- Extranjero que suministre paneles fotovoltaicos en el mercado de El Salvador usando canales de venta a distancia (internet), teléfono, etc.

El comercializador o distribuidor deberá registrarse en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la información proporcionada deberá ser similar a la que dan los productores.

Así también, deben otorgar a los usuarios finales un servicio gratuito de devolución de paneles fotovoltaicos, sin discriminar el distribuidor o comercializador con el que el usuario los adquirió. La metodología de la devolución puede ser propuesta por el distribuidor previa autorización de la autoridad estatal competente.

Se recomienda que la devolución se haga en los puntos de venta del distribuidor o en un centro de acopio externo dedicado exclusivamente para el acopio de paneles fotovoltaicos. Si el distribuidor elige recibir los residuos en su punto de venta la zona designada debe de cumplir los mismos requisitos que un centro de acopio externo. Posteriormente al acopio los residuos deben de ser llevados a una planta de tratamiento autorizada para dar disposición final.

Es un deber del comercializador o distribuidor ofrecer información a los usuarios finales sobre cuál es la metodología o pasos que seguir para llevar a cabo la devolución, así como sus responsabilidades como usuarios de los paneles fotovoltaicos. La información puede estar disponible en forma de cartilla que acompañe el producto o publicada su página web si la tuviese.

C. Responsabilidades del consumidor o usuario final.

Se considera consumidor o usuario final de paneles fotovoltaicos a una persona natural o jurídica que haga uso de estos productos para la generación de energía eléctrica de forma doméstica, comercial, industrial o investigativo.

Todo usuario de paneles fotovoltaicos es responsable de asegurar que cuando haya quedado fuera de uso por finalizar su vida útil o una falla temprana, los residuos lleguen a un lugar de acopio autorizado para su tratamiento y disposición.

Los residuos de paneles fotovoltaicos deben de mantenerse separado de otro tipo de residuos. En ese sentido, se recomienda que el traslado de los paneles hacia el punto de acopio se haga usando transporte que sea provisto por el distribuidor o comercializador y fabricante. Cuando sea posible se debe resguardar la integridad del panel hasta que llegue a la planta de tratamiento para su disposición final o reciclaje.

D. Responsabilidad del sistema de cumplimiento del productor.

El sistema de cumplimiento del productor se encarga de gestionar y administrar los recursos provistos por los miembros para que los planes de acopio, tratamiento, reciclaje o disposición final de los paneles fotovoltaicos se lleve a cabo de forma eficiente. Se recomienda que el sistema de cumplimiento del productor sea manejado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales a través del sistema de cumplimiento del productor deberá instalar centros de acopio en los municipios que cuenten con mayor capacidad instalada de generación fotovoltaica y que cuenten con los criterios adecuados. El número de centros de acopio deben de ser congruente con la capacidad fotovoltaica instalada en el país.

El sistema de cumplimiento del productor es el responsable de autorizar o dictar cual será el método de recolección de residuos. Las siguientes etapas de recolección deben ser reguladas por el sistema de cumplimiento del productor:

- Recibirlos directamente de los usuarios finales.

- Retirarlos de los puntos de venta de los distribuidores cuando así lo acuerden.
- Retirarlos de los centros de acopio

En cuanto a las plantas de tratamiento de paneles fotovoltaicos el sistema de cumplimiento del productor deberá velar que estas cumplan con los estándares y requisitos para la operación de las plantas.

4.7.2 Propuestas desde la perspectiva técnica.

Las propuestas desde la perspectiva técnica los procesos y tecnologías usadas por otros países analizados en la sección 4.6. Inicialmente se debe de conocer los componentes o materiales de un panel fotovoltaico y luego revisar las mejores técnicas disponibles en el mercado para el tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos.

- **Componentes del panel.**

Este apartado se basará en los paneles fotovoltaicos que usan la tecnología que usa el silicio (c-Si) como fuente de materia prima para su fabricación ya que es la tecnología fotovoltaica más antigua y actualmente domina el mercado con alrededor del 92 % de la cuota de mercado (ISE, 2014). Los paneles de silicio policristalino tienen una participación del 55% y los paneles de silicio monocristalino del 45% de la tecnología c-Si, respectivamente. Debido a los bajos índices de eficiencia, los productos a-Si se han discontinuado en los últimos años y la participación de mercado en la actualidad es insignificante (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por capas de diferentes materiales que optimizan el aprovechamiento del efecto fotovoltaico para la producción de energía. La unidad base de un panel es la celda fotovoltaica, compuesta por capas del semiconductor de silicio dopado de diferentes compuestos para optimizar su eficiencia fotoeléctrica una capa de silicio dopado con fósforo, llamada de capa de silicio tipo P; otra capa de silicio está dopada con boro y denominada de la capa de silicio tipo N; una capa de silicio puro la cual contiene los circuitos eléctricos necesarios. Estas capas de silicio se encuentran entre dos capas encapsulantes, compuestas de plástico especializado altamente transparente (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Las celdas se encuentran en una matriz de un material plástico y esponjoso para su protección hecha de etilvinilo de acetato (EVA). La matriz se ubica sobre la capa posterior del panel, hecha de plástico PVF o Bo-PET. El panel se cubre por una lámina de vidrio y lo sostiene un marco de aluminio (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Tabla 12 Componentes del panel fotovoltaico de c-Si.

Capa	Material
Encapsulante	Plástico
Silicio tipo P	Si + P
Capa de Unión	Si + circuitos eléctricos
Silicio tipo N	Si + B
Encapsulante	Plástico
Matriz	EVA
Capa posterior	PVF o Bo-PET
Marco	Aluminio
Cubierta	Vidrio

Fuente: IRENA & IEA-PVPS, 2016

4.7.2.1 Lineamientos técnicos del manejo para el residuo.

Se deben de considerar criterios a cumplir para la recuperación y tratamiento de residuos de paneles fotovoltaicos. Se recomienda tener en cuenta las siguientes prácticas:

1. Remover el marco metálico, la cubierta de vidrio y la capa posterior con fuerza mecánica. Estos materiales son reciclables e incluso reutilizables.
2. La matriz de EVA debe ser removida por los medios necesarios: fuerza mecánica preferiblemente. De lo contrario se pueden evaluar otros métodos de separación como el térmico (IEA-PVPS T12-10:2018).
3. Los circuitos eléctricos al interior de las celdas individuales deben ser removidos usando fuerza mecánica, triturando las celdas hasta poder extraer los circuitos. (IEA-PVPS T12-10:2018).

4. Las capas encapsulantes de las celdas individuales deben de ser separadas del material semiconductor entre ellas. La naturaleza de los materiales requiere un proceso químico para separarlos. Los compuestos utilizados para llevar a cabo este proceso deben ser tratados y reutilizados en la medida de lo posible (IEA-PVPS T12-10:2018).
5. El plástico encapsulante y el material semiconductor de manera separada deben ser lavados para remover cualquier traza de materiales peligrosos y corrosivos. Los materiales pueden tratarse posteriormente y volver a ser utilizados como materia prima para la fabricación de paneles fotovoltaicos (IEA-PVPS T12-10:2018).
6. Se recomienda que todo el proceso se lleve a cabo aplicando la regulación vigente para el tratamiento de aguas y desechos residuales generados por el proceso de reciclaje o disposición final.

4.7.2.2 Opciones para el tratamiento del residuo.

Se ha considerado los lineamientos técnicos, métodos de tratamiento y disposición final usadas en otros países vistos en el apartado 4.6. Se propone tener en cuenta las siguientes alternativas (Ramírez, 2018):

1. **Reciclaje de aluminio:** se desmonta el marco de aluminio del panel. Se lleva el aluminio a reciclaje
2. **Reciclaje de vidrio:** se remueve la cubierta de vidrio del panel. El vidrio es llevado a reciclaje.
3. **Reciclaje de plástico:** la cubierta posterior es removida y llevada a una planta de reciclaje de plástico.
4. **Reciclaje de plástico, matriz EVA:** las celdas fotovoltaicas y la matriz de plástico EVA en la que se encuentran incrustadas se llevan a una plataforma de vibración con el fin de separar ambas partes. El plástico EVA se lleva a reciclaje.
5. **Reciclaje de metales:** las celdas individuales son trituradas y se remueve el componente eléctrico. El metal extraído se recicla.

4.7.3 Propuestas desde la perspectiva normativa

La legislación de El Salvador no posee leyes específicas para la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos, pero posee reglamentos para la gestión de desechos sólidos, peligrosos y electrónicos.

Para emitir propuestas en la normativa del país primero se debe de definir en cuál categoría entran los residuos de paneles fotovoltaicos. Como se mencionó en la sección 4.8.3., tienen como una de sus materias primas el Silicio (c-Si), aluminio, etc., por lo que se vuelve importante verificar si estos compuestos químicos caben dentro de la categoría de desechos peligrosos. Según el decreto ejecutivo N°41 “Reglamento Especial En Materia De Sustancias, Residuos Y Desechos Peligrosos” en su artículo N°23, no menciona explícitamente los residuos producto de paneles fotovoltaicos y tampoco alguno de sus componentes químicos ya conocidos. De forma similar, sucede en el reglamento de desechos sólidos y electrónicos.

Si un desecho se considera como peligroso o no dependerá de categorización de cada país.

4.7.3.1 Antecedentes.

La clasificación de residuos de paneles fotovoltaicos sigue los principios básicos de la clasificación de residuos. Esto también considera la composición del material por masa o volumen y las propiedades de los componentes y materiales utilizados (por ejemplo, solubilidad, inflamabilidad, toxicidad). Da cuenta de posibles vías de movilización de componentes y materiales para diferentes escenarios de reutilización, recuperación, reciclaje y eliminación (por ejemplo, lixiviación de materiales a las aguas subterráneas, admisión de partículas en el suelo). El objetivo general de estos principios de clasificación es identificar los riesgos para el medio ambiente y la salud humana que un producto podría causar durante la gestión al final de su vida útil. El objetivo es prescribir vías de eliminación y tratamiento para minimizar estas amenazas. El riesgo de que los materiales se filtren del producto al final de su vida útil o de sus componentes al medio ambiente es muy significativo, y la evaluación de esta amenaza ayuda a definir las medidas de contención necesarias. Sin embargo, este es solo un posible riesgo. Otros ejemplos

evaluados a través de la caracterización de desechos incluyen la inflamabilidad, los peligros de exposición humana a través del contacto con la piel o la inhalación. Los riesgos evaluados pueden diferir según el país y la jurisdicción. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

En 2015, dos tercios de los paneles fotovoltaicos instalados en todo el mundo eran paneles c-Si. Normalmente, más del 90 % de su masa está compuesta por vidrio, polímero y aluminio, que pueden clasificarse como residuos no peligrosos. Sin embargo, los componentes más pequeños de los paneles de c-Si pueden presentar dificultades de reciclaje, ya que contienen silicio, plata y trazas de elementos como el estaño y el plomo (juntos representan alrededor del 4 % de la masa). Los paneles de película fina (el 9 % de la producción anual mundial) se componen de más del 98 % de vidrio, polímero y aluminio (residuos no peligrosos), pero también de cantidades modestas de cobre y zinc (juntos, alrededor del 2 % de la masa), que son residuos potencialmente peligrosos para el medio ambiente. También contienen semiconductores o materiales peligrosos como indio, galio, selenio, cadmio, telurio y plomo. Los materiales peligrosos necesitan un tratamiento particular y pueden caer bajo una clasificación de residuos específica dependiendo de la jurisdicción. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.7.3.2 Criterio clave para la clasificación de residuos de paneles fotovoltaicos: Pruebas de lixiviación

Países como Estados Unidos, Alemania y Japón han categorizado los desechos de paneles fotovoltaicos usando la prueba de lixiviación.

El criterio clave para determinar la clasificación de los residuos es la concentración de ciertas sustancias en un líquido que ha estado expuesto a fragmentos de paneles fotovoltaicos rotos durante un período de tiempo definido en una proporción determinada. Este lixiviado generalmente disuelve algunos de los materiales presentes en la muestra sólida y, por lo tanto, puede analizarse para determinar la concentración en masa de ciertas sustancias peligrosas. Diferentes jurisdicciones, como Alemania, EE. UU. o Japón, proporcionan diferentes valores de umbral para las concentraciones de lixiviados permitidas para que un material de desecho se caracterice como desecho no peligroso.

Por ejemplo, el umbral para la concentración de lixiviados de plomo que permite clasificar un panel como peligroso es de 5 miligramos por litro (mg/l) en EE. UU. y de 0,3 mg/l en Japón. Para el cadmio, el umbral de peligrosidad es de 1 mg/l en EE. UU., 0,3 mg/l en Japón y 0,1 mg/l en Alemania. Estos se comparan con los resultados de pruebas de lixiviación disponibles públicamente en la literatura (resumidos en Sinha y Wade, 2015) para paneles fotovoltaicos de c-Si y CdTe. Van desde no detectado hasta 0,22 mg/l para cadmio y no detectado hasta 11 mg/l para plomo. Por lo tanto, en diferentes jurisdicciones, los paneles de CdTe y c-Si pudiesen considerarse desechos peligrosos o no peligrosos según los resultados de estas pruebas. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

4.7.4 Opciones de cambio de regulación.

Como ya se mencionó anteriormente (Ver 4.8.4.) es importante definir si los residuos de un panel fotovoltaico son peligrosos o no ya que eso dependerá el tipo de tratamiento que se le realizará.

En ese sentido, la regulación legal existente dependerá de la categorización de los residuos.

Opción A: Categorización como desecho peligroso.

Si los desechos producto de paneles fotovoltaicos posterior a una prueba de lixiviación y según criterios del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales u otra institución competente determinen que los residuos entran en la categoría de desechos peligrosos de forma total o parcial de acuerdo con el material. El Salvador cuenta con legislación vigente para este tipo de desechos como lo son:

- Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos.
- Lineamientos técnicos para el adecuado manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

En ambos casos existe una base sólida para la gestión de los residuos, sin embargo, se recomienda incluir las recomendaciones técnicas (Ver 4.8.3.).

Opción B: Categorización como desecho común o no peligroso.

Si los desechos producto de paneles fotovoltaicos posterior a una prueba de lixiviación y según criterios del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales u otra institución competente determinen que los residuos entran en la categoría de desechos comunes y no peligrosos de forma total. El Salvador cuenta con legislación vigente para este tipo de desechos como lo es:

- **Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos.**

Se recomienda que a pesar de que los residuos de paneles fotovoltaicos entren en esta categoría no se les dé el mismo tratamiento ya que al hacerlo riñe en gran medida con los casos de éxito de otros países. Además, de la complejidad que se añadiría al sistema de recolección de desechos comunes con el que cuenta El Salvador, hecho por los gobiernos municipales y cuya disposición final son en vertederos a cielo abierto y en rellenos sanitarios (Decreto Ejecutivo N°41, Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos) que poseen mínimos controles y por otro lado no se contempla en dicho reglamento el reciclaje de algunos materiales que podría ser una opción a considerar e implementada en Estados Unidos y Reino Unido. (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE EMPRESAS DE RECICLAJE Y DISPOSICIÓN FINAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Debido a que los paneles fotovoltaicos están compuestos por un conjunto diverso de materiales, los procesos de reciclaje deben tener en cuenta una amplia gama de características de los residuos. Las opciones básicas de eliminación de los paneles fotovoltaicos se describen en la Tabla 13.

Tabla 13 Operaciones básicas de tratamiento y reciclaje de paneles fotovoltaicos

Tipo de tratamiento	Posibles pasos de tratamiento involucrados
Fisico/Metalico	Aplastante Desgaste Separación de densidad Flotación Adsorción Radiación Separador de metales Otro
Quimico	Tratamiento ácido/base Tratamiento con solvente Otro
Termico	Incineración pirólisis Fusión, Escoriación Otro
Biologico	
Radiacion	
Desecho	Reciclado en el mismo producto Reciclaje en otro producto recuperación de energía del tratamiento térmico de capas orgánicas Utilización del volumen de fracciones minerales. cubierta de vertedero otro

Fuente: (Ökopol, 2007)

Existen varios tipos de opciones de reciclaje y tratamiento, que varían según el productor y el tipo de tecnología fotovoltaica considerada. La tabla 13 que se presenta a continuación, muestra algunas tecnologías de reciclaje conocidas, que están actualmente en desarrollo y han completado la mayoría de las pruebas de laboratorio requeridas.

Tabla 14 Algunas actividades de reciclaje conocidas

OPERADOR	PROCEDIMIENTO	TAMAÑO/ETAPA DE DESARROLLO	TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA
DEUTSCHE SOLAR	Separación térmica, procesamiento químico	Producción piloto, consideración ecológica	Película delgada y cristalina en laboratorio
PRIMERA SOLAR (CELULAS SOLARES INC. BNL)	Descomposición térmica en gas inerte	laboratorio	Cristalino.
ISOFOTÓN	Reciclaje celular, hinchamiento, trituración, módulo reparable	laboratorio	Cristalino.
AIST, AGUDO, ASAHI	Reciclado de obleas con ácidos minerales, hinchamiento con disolvente, módulo reparable	laboratorio	Cristalino.
FOTOVOLTEC	módulo reparable	laboratorio	Cristalino.
BP SOLAR, SOLTECH	Reciclado de obleas con ácidos minerales, reciclado de obleas en lecho fluidizado	laboratorio/escuela técnica	Cristalino.
PILKINGTON SOLAR INTERNACIONAL	separación térmica.	laboratorio/escuela técnica	Cristalino.
SIEMENS SOLAR, SHELL SOLAR, SHOWA SHELL	Producción de ferrosilicio, chorro de agua a alta presión	laboratorio	Película delgada y cristalina
OTRO	Trituradora de módulos, separación mecánica, tratamiento ácido, fundición, agregados de hormigón MWI, construcción de carreteras	laboratorio	Película delgada y cristalina
DISPOSITIVO	eliminación de marcos y cables, eliminación, incineración	producción	todos

Fuente: (Ökopol, 2007).

Aunque alrededor del mundo se están desarrollando varios procesos de tratamiento y reciclaje de paneles fotovoltaicos, actualmente sólo hay dos tecnologías de tratamiento y reciclaje que se han probado y puesto en funcionamiento: El proceso de Deutsche Solar (actualmente operativo en Alemania) que se utiliza principalmente para los paneles de silicio cristalino, y el proceso de First Solar (actualmente operativo en Estados Unidos, Alemania y Malasia) que se utiliza principalmente para los paneles de cualquier tipo (amorfo, policristalinos, monocristalinos, bifacial, etc.)

Los procedimientos de tratamiento y reciclaje de los paneles fotovoltaicos son similares a los del reciclaje de los LCD, el vidrio de las pantallas, los espejos, los parabrisas, otros vidrios laminados y las lámparas de descarga de gas, debido a su gran proporción de vidrio.

5.1 Proceso de tratamiento de Deutsche Solar AG

Deutsche Solar AG y su grupo matriz, SolarWorld con sede en Bonn, operaban con un sistema de recogida y tratamiento de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil o dañados. con instalaciones de producción en Arnstadt, Turingia, Freiberg y Sajonia, y con puntos de venta en Alemania, Singapur y Sudáfrica.

Cuando su proceso de reciclaje estaba en funcionamiento, Deutsche Solar AG reutilizaba los gránulos de silicio recuperados en las operaciones de tratamiento y vendía o enviaba a reciclar todos los demás materiales. Si bien el proceso de tratamiento de paneles de silicio cristalino de Deutsche Solar AG funcionaba como un plan piloto desde 2003, se ha detenido desde entonces debido al elevado coste del reciclaje de paneles fotovoltaicos, ya que el volumen de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil es limitado en la actualidad. Según el Dr. Wambach de Sunicon, una filial del grupo Solar World, para que el reciclaje sea económicamente atractivo, los paneles tendrían que almacenarse y reciclarse una vez que se haya acumulado una determinada cantidad y estima que el umbral de cantidad mínima en el que el reciclaje de paneles fotovoltaicos sería económicamente viable es de unas 20.000 toneladas al año, aunque estima que entre 40.000 y 50.000 toneladas al año es un punto más realista en el que el reciclaje de paneles fotovoltaicos sería económicamente atractivo.

El proceso de tratamiento y reciclaje desarrollado por Deutsche Solar implica la eliminación de los componentes de plástico del panel mediante un proceso térmico, seguido de la separación manual de los materiales restantes, como las células solares, el vidrio y los metales. El vidrio y los metales, incluidos el aluminio, el acero y el cobre, se introducen en los procesos de reciclaje correspondientes y las células solares se vuelven a grabar en la oblea. Las células solares se limpian a través de una serie de etapas químicas, hasta que surge una nueva oblea de silicio. Las obleas tratadas de nuevo

cumplen los requisitos de calidad estándar y pueden volver a procesarse como células y paneles solares. El proceso de grabado implica la siguiente secuencia de pasos: eliminación de la metalización, de la capa AR, eliminación isotrópica del dopaje n+ y p+, un acabado de la superficie, enjuague y secado. En el caso de las células solares rotas, el silicio se recupera en forma de obleas rotas para su cristalización.

Cabe destacar que el procedimiento ofrece la posibilidad de recuperar las obleas intactas de los paneles. La tasa media de reciclaje es de aproximadamente el 80%, sin tener en cuenta el posible tratamiento térmico de los componentes de plástico. Si el proceso se aplica correctamente, el vidrio puede recuperarse totalmente intacto. La tabla 15 muestra la actividad típica de reciclaje y reutilización para cada tipo de material tratado en un panel fotovoltaico c-Si. (Larsen, 2009).

Tabla 15 Actividad típica de reciclaje y reutilización

Oblea de Silicio	Venta
Granulados de Silicio	Venta, uso propio
Plata	Venta, reciclaje de metales
Aluminio	Venta, reciclaje de metales
Acero	Venta, reciclaje de metales
Cobre	Venta, reciclaje de metales
Copa	Venta, reciclaje de vidrio
Embalaje	Eliminación, reciclaje, (disposición)
Restos	Eliminación (residuos mixtos)

Fuente: (Larsen, End of life PV: then what? Recycling solar PV panels, 2009)

5.2 El proceso de tratamiento de First Solar

First Solar es una empresa estadounidense creada en 1999, que lanzó la producción de productos comerciales fotovoltaicos basados en CdTe (El telururo de cadmio) en 2002. Es un proveedor líder mundial de soluciones integrales de energía solar fotovoltaica con más de 17 GW instalados en más de 35 países. Diseñan, fabrican y venden módulos solares fotovoltaicos con una avanzada tecnología de semiconductores de película fina y desarrollan, diseñan, construyen y venden centrales eléctricas fotovoltaicas que utilizan principalmente los módulos solares. First Solar ha demostrado cierto compromiso con el

medio ambiente al garantizar que todas las etapas del proceso de fabricación de los módulos fotovoltaicos, incluido el final de su vida útil, generan bajas emisiones de carbono. En consecuencia, la empresa afirma que su huella de carbono es la más baja entre las tecnologías fotovoltaicas disponibles, y se compara bien con las tecnologías eólicas. (Lincot, 2009)

First Solar ocupa desde hace tiempo una posición de liderazgo en el reciclaje fotovoltaico. La empresa estableció el primer programa voluntario de reciclaje de módulos prefinanciado a nivel mundial en 2005 y es el único fabricante fotovoltaico capaz de ofrecer servicios de reciclaje fotovoltaico a nivel mundial en la actualidad. Con más de una década de experiencia en la explotación de instalaciones de reciclaje fotovoltaico de alto valor a escala global e industrial, su inigualable experiencia e infraestructura de reciclaje interna permite reducir continuamente los precios de reciclaje para los clientes. (First Solar , 2011)

Los servicios de reciclaje de First Solar, líderes en el sector, permiten a los propietarios de centrales y módulos fotovoltaicos cumplir con su obligación de fin de vida útil (EOL) de los módulos de forma sencilla, rentable y responsable. Sus instalaciones de reciclaje de última generación están operativas en Estados Unidos, Alemania y Malasia, y tienen una capacidad escalable para acomodar un alto volumen de reciclaje a medida que más módulos llegan al final de su vida útil de más de 25 años. (First Solar , 2017)

El proceso de reciclaje de alto valor de First Solar recupera aproximadamente el 90% del vidrio para su reutilización en nuevos productos de vidrio y más del 90% del material semiconductor para su reutilización en nuevos módulos.

El proceso de tratamiento inicia con la recolección de los paneles, que posteriormente son triturados y luego llevados a un molino de martillos para lograr que el tamaño de partícula de los restos de vidrio tenga un diámetro de entre 4-5 mm, lo cual es suficiente para garantizar la ruptura de la unión de la laminación. A continuación, se eliminan las películas semiconductoras colocando los fragmentos de material en un acero inoxidable giratorio con ácido y peróxido de hidrógeno, para luego separar los fragmentos de vidrio

de las partes líquidas de los residuos y con ayuda de una criba vibratoria, separar el vidrio de los trozos de material laminado, que previamente sellaron las dos capas de vidrio. El vidrio se limpia para eliminar cualquier resto de material semiconductor y se envasa para su reciclaje.

La parte líquida de los residuos se bombea a una unidad de precipitación y los compuestos metálicos que se encuentran en el líquido se precipitan en tres etapas a un pH creciente, utilizando hidróxido de sodio. Los materiales precipitados se concentran en un tanque de espesamiento para su deshidratación y los materiales semiconductores no refinados resultantes se envasan para su procesamiento por parte de un tercero con la finalidad de crear materiales semiconductores para su uso en nuevos paneles fotovoltaicos. Cabe mencionar, que las principales materias primas recuperadas de los residuos de semiconductores son Te y el Cd. (Ökopol, Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products, 2007)

Dado que el proceso de First Solar se basa en el uso de materiales de paneles fotovoltaicos triturados, el proceso permite reciclar no sólo los paneles intactos al final de su vida útil, sino también los paneles rotos y la chatarra de fabricación. First Solar también ofrece un programa de reciclaje y recogida gratuito para el reciclaje y tratamiento de los paneles fotovoltaicos e incluye información de contacto para el reciclaje.

En Malasia, el material laminado de First Solar se recicla ahora para su reutilización en alfombras de goma, mangos de bicicletas y suelas de zapatos, cerrando así aún más el ciclo de vida del producto. El resto de la chatarra de los módulos reciclados (aproximadamente entre el 5 y el 10 por ciento) que no puede utilizarse en materias primas secundarias se gestiona mediante otras técnicas responsables de tratamiento y eliminación de residuos. Debido a la trituración, el aplastamiento y el calentamiento que suelen conllevar los procesos de reciclaje, las pérdidas de material son inevitables, y el porcentaje de recuperación es siempre inferior al 100%. (McKinney & Yonavjak, 2013)

5.3 PV Cycle (Ciclo FV)

PV Cycle es un programa creado por las industrias europeas de fabricación fotovoltaica. El programa se fundó en 2007 para poner en práctica el compromiso de la industria fotovoltaica de crear un programa voluntario de recogida y reciclaje [40]. Los fabricantes que componen PV Cycle adoptan el concepto de responsabilidad del productor y pretenden ofrecer una solución de energía solar completamente sostenible. Sin embargo, este tipo de iniciativa sólo funciona si la industria está dispuesta a participar voluntariamente en la fabricación responsable desde el punto de vista medioambiental, lo que todavía no es aplicable a nivel mundial. Sin que este tipo de iniciativa esté regulada, las empresas fabricantes son libres de retirarse del programa.

Con un total de 15.042 toneladas procesadas desde el inicio de sus operaciones en 2010 – 1,803 toneladas en 2016-, PV Cycle siguió manteniendo su posición de liderazgo mundial en la recogida y el tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos. Mientras que la empresa registró un aumento moderado en los mercados de residuos tradicionalmente de gran volumen de Alemania, Italia y España, sus operaciones aumentaron más del 60% en Francia y Bélgica en 2016. Al mismo tiempo, su número de miembros aumentó a más del doble (D., 2009).

En febrero de 2016, la Asociación anunció un nuevo récord en el reciclaje de módulos fotovoltaicos de silicio, alcanzando una tasa de reciclaje del 96%. El proceso avanzado, que permite reciclar escamas de silicio (una combinación de laminado, semiconductores a base de silicio y metales) de forma económica y respetuosa con el medio ambiente, se está aplicando actualmente en uno de los socios de reciclaje de silicio fotovoltaico con sede en Europa de PV Cycle.

PV Cycle ha alcanzado nuevos acuerdos de colaboración con varias instalaciones de tratamiento a finales de 2016. En noviembre de 2016, PV Cycle convocó una licitación para buscar más socios de tratamiento específicamente para el mercado francés. Las mejoras e innovaciones tecnológicas son fundamentales para sus operaciones de tratamiento de residuos (PV Cycle , 2016). Como parte de los esfuerzos de la empresa por mejorar continuamente y fomentar las inversiones en nuevas e innovadoras

tecnologías de tratamiento de residuos, PV Cycle también participa en varios proyectos de I+D.

PV Morede, financiado por el Programa de Ecoinnovación de 2012, investigó el desarrollo y la industrialización de un dispositivo de reciclaje móvil patentado. En comparación con otros sistemas de residuos industriales, PV Morede puede tratar los módulos fotovoltaicos directamente en el lugar donde están instalados, ofreciendo así una solución de tratamiento de residuos rentable y de fácil acceso para pequeñas cantidades de paneles fotovoltaicos. En una fase posterior, los socios del proyecto se disponen a trabajar en un plan de comercialización de la innovadora planta de reciclaje.

CU-PV es un proyecto paneuropeo de I+D en el marco del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea. Con el objetivo de mejorar el perfil medioambiental de los módulos fotovoltaicos de silicio, los socios de CU-PV investigaron la reducción de la plata y el plomo en la energía fotovoltaica, las formas de diseño ecológico y el tratamiento de alto valor al final de la vida útil. Al reunir a los socios de investigación, producción y tratamiento de residuos en este proyecto, CU-PV cubrió todo el ciclo de vida de un módulo fotovoltaico basado en el silicio.

5.4 Situación actual del reciclaje fotovoltaico.

En la actualidad, el reciclaje de paneles fotovoltaicos no es económicamente viable porque los volúmenes de residuos generados son demasiado pequeños, pero con el tiempo la introducción de incentivos económicos y el concepto de responsabilidad ampliada del productor podrían cambiar esta situación (Larsen, End of life PV: then what? Recycling solar PV panels, 2009). Sin la introducción de un impuesto sobre el carbono o la fijación de un precio del carbono para tener en cuenta las externalidades medioambientales, a pesar de su mayor intensidad energética para la producción, es más barato utilizar materias primas vírgenes en la producción de paneles fotovoltaicos. Si bien esto sigue siendo cierto, en el caso de los paneles basados en silicio, debido a la abundante oferta de silicio como materia prima, existen más incentivos económicos potenciales para los paneles de CIS, CIGS y CdTe debido a la rareza del indio y el telurio, especialmente en comparación con el crecimiento previsto en la industria fotovoltaica.

Teniendo en cuenta las cantidades limitadas de residuos que se producen en la actualidad, un reto para el reciclaje de paneles fotovoltaicos es el coste de organizar su recogida y transporte a lugares de tratamiento y reciclaje centralizados. El Dr. Wambach considera que el almacenamiento intermedio de los residuos de paneles fotovoltaicos es una opción posible a corto plazo, hasta que entren en el mercado mayores cantidades de residuos fotovoltaicos.

5.5 Futuros avances en el reciclaje de paneles fotovoltaicos

Como se mencionó anteriormente, el proceso de Deutsche Solar AG se ha utilizado para diversos tipos y tamaños de paneles fotovoltaicos basados en el silicio y First Solar comparte conocimientos técnicos con otros productores y ha probado sus procesos en otros paneles de CdTe y está completando las pruebas en las tecnologías CIS y CIGS. Sin embargo, el conjunto de productos reciclados mediante estos procesos no es necesariamente representativo del conjunto actual de productos instalados, lo que hace difícil prever la aplicabilidad de estos procesos en el futuro a los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.

Es difícil evaluar los resultados futuros de los esfuerzos actuales de investigación, desarrollo y prueba de los paneles fotovoltaicos y de las nuevas técnicas de reciclaje. Se están desarrollando paneles fotovoltaicos con soldadura sin plomo. Las principales tecnologías fotovoltaicas potenciales que se están desarrollando actualmente son:

- Células solares sensibilizadas por colorantes
- Células solares orgánicas
- Células híbridas

Mientras que las células solares sensibilizadas por colorantes liberan electrones a partir de, por ejemplo, dióxido de titanio cubierto de un pigmento que absorbe la luz solar, las células solares orgánicas están compuestas por materiales biodegradables, lo que introduce un riesgo de degradación e inestabilidad del material. Las células híbridas, que combinan varias tecnologías actualmente en el mercado, podrían ser tratadas con técnicas de reciclaje similares a las actuales.

Además de las directivas específicas de cada país, existen algunas iniciativas y programas de reciclaje fotovoltaico de diferentes fabricantes y asociaciones. La mayoría de estas iniciativas se desarrollan de forma voluntaria con el objetivo de reciclar de forma segura y eficiente los productos fotovoltaicos.

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS MÓDULOS FVOLTÁICOS

6.1 Definición y alcance del análisis del ciclo de vida.

La evaluación del ciclo de vida (LCA) es un método estructurado y completo para cuantificar los flujos de materiales y energía y sus impactos asociados en los ciclos de vida de los productos (es decir, bienes y servicios) (IEA-PVPS T12-19:2020)

Este capítulo tiene como objetivo reportar los principales impactos ambientales que causan los paneles fotovoltaicos. En cuanto al alcance este estudio se limita a desarrollar brevemente las etapas más importantes del ciclo de vida de un panel fotovoltaico, como lo son; el inventario de los principales elementos que conforman un panel fotovoltaico de silicio cristalino; su composición; clasificación de los desechos y los métodos de reciclaje más representativos. Por último, describir algunas métricas usadas para medir el impacto ambiental.

6.2 Ciclo de vida.

6.2.1 Generalidades.

La evaluación del ciclo de vida (LCA) nos permite tener en cuenta las etapas del ciclo de vida, al medir la sostenibilidad ambiental y de los recursos. Tal como se muestra en la Figura 15 el ciclo de vida de la energía fotovoltaica comienza con la extracción de materias primas y finaliza con la disposición final del sistema fotovoltaico que han sufrido algún desperfecto o daño (Ver figura 16) (IEA-PVPS T12-19:2020)

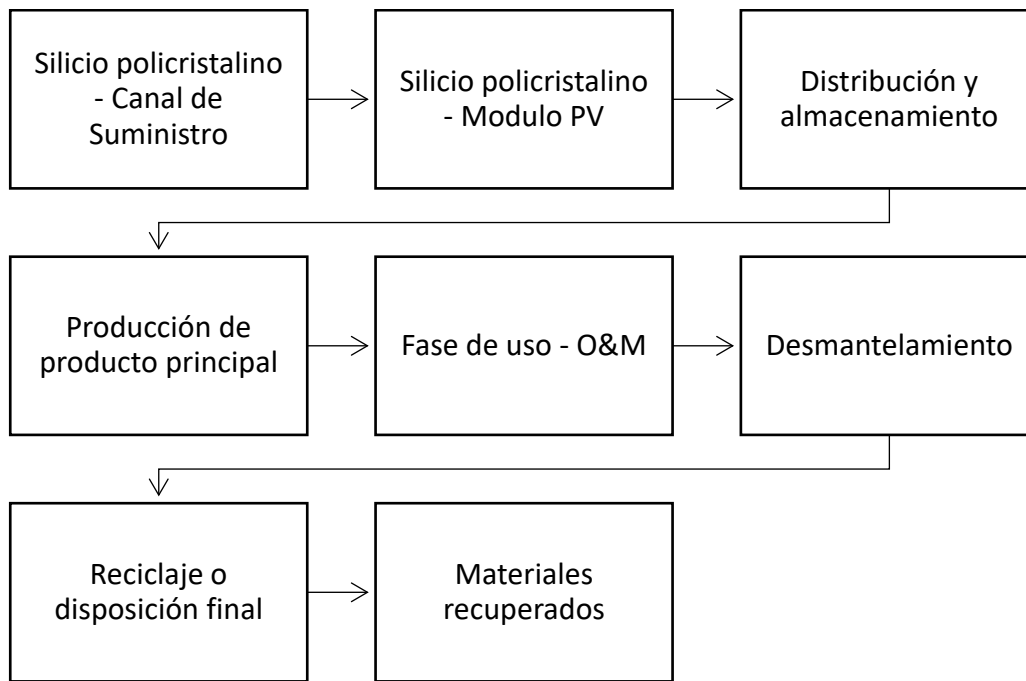


Figura 16 Flujo de etapas del ciclo de vida de un panel fotovoltaico de Silicio Policristalino.

Fuente: IEA-PVPS T12-19:2020.

A la extracción de materias primas, por ejemplo, arena de cuarzo para fotovoltaicos de silicio, le siguen etapas adicionales de procesamiento y purificación para lograr la alta pureza requerida, lo que generalmente implica una gran cantidad de consumo de energía. La sílice, contenida en la arena de cuarzo se reduce en un horno de arco a silicio de grado metalúrgico, que debe purificarse aún más en silicio de grado solar (99,99%), generalmente a través de un proceso de Siemens modificado (IEA-PVPS T12-19:2020).

Las materias primas incluyen aquellas para encapsulaciones y componentes de equilibrio del sistema, por ejemplo, sílice para vidrio, mineral de cobre para cables y minerales de hierro y zinc para estructuras de montaje.

La fabricación de un dispositivo fotovoltaico de silicio a granel se divide en varios pasos, es decir, oblea, celda y módulo. En la etapa de oblea, los lingotes de silicio monocristalino o policristalino de grado solar se cortan en obleas de ~0,2 mm de espesor. Durante la etapa de celda, se forma una unión p-n por difusión de dopantes y se crea un circuito

eléctrico aplicando y sinterizando pastas de metalización. En la etapa del módulo, las células se conectan física y eléctricamente y se encapsulan con vidrios y plásticos.

La etapa de fabricación es relativamente simple para los fotovoltaicos de película delgada que generalmente se basan en la deposición de la capa de semiconductores seguida de la definición de la celda, así como en los pasos de fabricación del módulo (por ejemplo, encapsulación) similares a los de los fotovoltaicos de silicio.

Durante la etapa de instalación del sistema fotovoltaico, se levantan las estructuras de soporte, se montan los sistemas fotovoltaicos y se integran los módulos fotovoltaicos, los cables y el acondicionamiento de energía y, posiblemente, el equipo de almacenamiento. Al final de su vida útil, los sistemas fotovoltaicos se retiran del servicio y se desechan con piezas y materiales valiosos reciclados (IEA-PVPS T12-19:2020)

6.2.2 Canal de suministro Silicio Cristalino.

La figura 16 muestra la cadena de suministro de la producción de electricidad fotovoltaica según Jungbluth et al. (IEA PVPS Task 12). Las cadenas de suministro ya existentes para Europa y China se amplían con dos regiones más del mundo, a saber, América del Norte (EE. UU.) y Asia y el Pacífico (APAC). Además, se introducen mercados mundiales al nivel de la producción de polisilicio, la producción de obleas y la producción de paneles. (IEA-PVPS T12-19:2020)

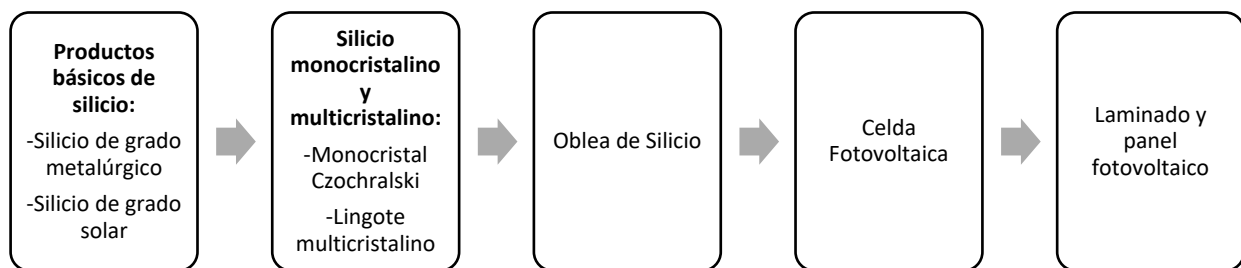


Figura 17 Cadena de suministro de producción de electricidad fotovoltaica basada en silicio

Fuente: IEA-PVPS T12-19:2020

6.2.3 Mezcla de mercados.

La figura 17 y tabla 15 muestra las cuotas de mercado de las cuatro regiones del mundo en los diferentes niveles de la cadena de suministro en 2018. La producción se expresa en MW de energía fotovoltaica y se basa en el informe de mercado de 2019 de IHS Markit. La cantidad de silicio en toneladas métricas se convierte a MW con base en un consumo promedio de alrededor de 3,910 kg de poli silicio por MW de capacidad de energía fotovoltaica (IEA-PVPS T12-19:2020)

La producción de poli silicio se distribuye de manera bastante uniforme en las cuatro regiones del mundo, y China tiene la participación más alta. China y Asia y el Pacífico (APAC) aportan alrededor del 78 % al mercado mundial de poli silicio. Las obleas, células y módulos se producen principalmente en China (con cuotas del 95,5 %, 68,3 % y 69,5 %, respectivamente, de la producción mundial) y en APAC (con cuotas del 4,1 %, 30,8 % y 23,0 %, respectivamente, de la producción mundial). Europa y América producen alrededor del 3,4 % y el 4,1 % de los módulos fotovoltaicos, respectivamente. A diferencia de la producción, que tiene lugar principalmente en Asia, casi el 29 % de los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino se instalan en Europa (12,5 %) y América (16,1 %). La mayor parte se monta en China (45,1 %), y en APAC (26,4 %) (IEA-PVPS T12-19:2020)

Tabla 16 Cuota de mercado en MW de potencia.

	Instalación c-Si	Módulos	Celdas	Obleas	Polisilicio
Europa	12,383	3,468	582	455	15,244
América	16,004	4,103	308	0	10,105
Asia y Pacífico	26,204	23,245	32,483	4,225	22,304
China	44,947	70,120	71,996	98,546	66,434

Fuente: IEA-PVPS T12-19:2020

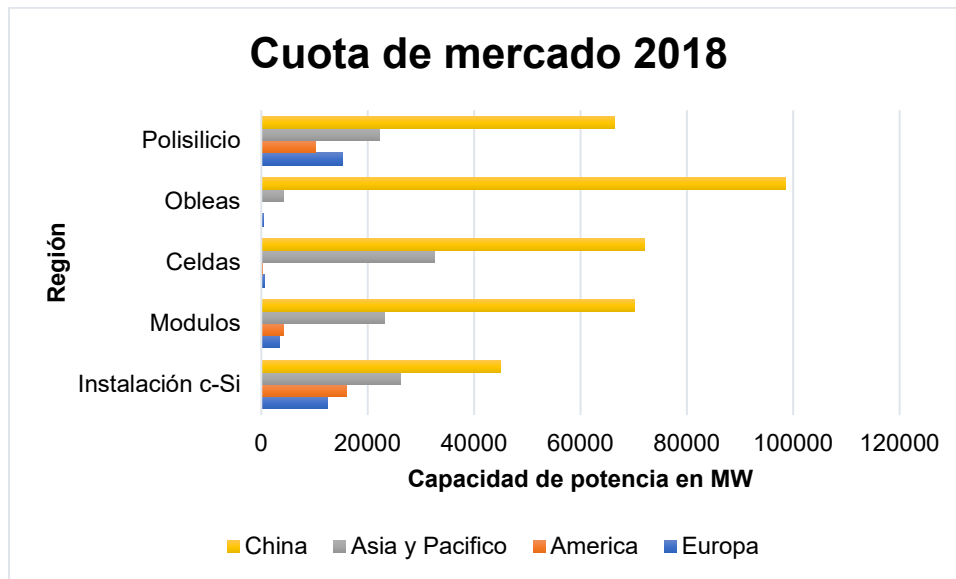


Figura 18 Cuotas de mercado en 2018 de las cuatro regiones del mundo en polisilicio, producción de obleas, fabricación de células y módulos de silicio cristalino, y módulos de silicio cristalino instalados, en capacidad de potencia MW

Fuente: IEA-PVPS T12-19:2020

6.2.4 Distribución y almacenamiento.

6.2.4.1 Logística de distribución.

La logística de distribución es una etapa de la cadena de suministro que se encarga de gestionar las actividades relacionadas con la distribución de productos hacia los compradores incluyendo almacenaje y entrega.

Distribución es un concepto empleado en la producción y el comercio para describir la etapa de la cadena de abastecimiento (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada)

Funciones de la distribución:

Las principales funciones de la distribución son:

- **Transportar:** actividad necesaria para movilizar los productos.
- **Fraccionar:** actividad dirigida a ubicar los productos fabricados en las cantidades y condiciones que requiera el mercado.

- **Almacenar:** proceso que consiste en asegurar productos entre el momento de la fabricación y el momento de compra.
- **Informar:** acción que permite el conocimiento de las necesidades del mercado para actualizar y mejorar las estrategias de mercado y logística interna. (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada)

6.2.5 Transporte.

Es la actividad que se ocupa de todas las actividades relacionadas con la necesidad de llevar los productos al punto que corresponda con determinadas condiciones de seguridad, servicio y costo. (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada)

Modalidades de transporte:

- **Transporte terrestre:** Se ha convertido en un eslabón clave para el éxito de las organizaciones que requieren llevar sus productos a los mercados internos y externos del país. Se destacan entre sus ventajas la versatilidad, accesibilidad y documentación sencilla, sin embargo, tiene desventajas como lo son las demoras de tiempo y no es apto para recorridos de grandes distancias. (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada)
- **Transporte marítimo:** se realiza por medio de buques de navegación entre el lugar de carga y lugar de descarga. Es el medio de transporte de mercancía más antiguo y permite además el desarrollo del comercio exterior. Las ventajas más representativas están la mayor capacidad de carga, fletes de bajo costo, flexibilidad de carga y regulaciones internacionales y entre sus desventajas están la accesibilidad solo a puertos, necesidad de embalaje resistente debido a las manipulaciones de carga, riesgos de saqueo y deterioro (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada).
- **Transporte aéreo:** este tipo de transporte asume un tamaño reducido del transporte internacional, pero tiene un alto valor añadido. Este método se ha desarrollado a través de los aviones de carga. Sus ventajas son la velocidad, cobertura de mercado, reducción de costos en embalaje y seguridad, sus

principales desventajas son la capacidad y restricción para productos peligrosos (Logística de Distribución, Universidad Militar Nueva Granada).

6.2.6 Factores principales de la logística fotovoltaica.

- 1. Distancia:** por regla general las materias para poner en marcha una planta fotovoltaica no siempre se encuentran en el lugar en el cual se va a establecer la misma, es decir, todos los componentes proceden de países diversos y deben ser transportados con seguridad por un encargado logístico que conozca las particularidades del producto, ya que se van a recorrer trayectos muy largos
- 2. Combinación de varias modalidades de transporte (marítimo y terrestre):** existen diversas modalidades de transporte, pero sin duda en este caso los que prevalecen son el transporte terrestre y el marítimo, de acuerdo con las características de la industria fotovoltaica son las más efectivas y adecuadas.
- 3. Peculiaridad en el tratamiento de materiales:** algunos pueden ser frágiles y de gran dimensión, por lo que se hace necesario conocer al detalle sus cualidades y tratamiento antes de poner en marcha su transporte.
- 4. Viabilidad y estudio previo antes de la ejecución del proyecto:** se hace necesario realizar una memoria o informe previo a la instalación fotovoltaica.
- 5. Manejar las partidas arancelarias, el flujo de transportes y coordinación de proyecto.**
- 6. Capacidad de gestión de las aduanas en destino y la logística a la obra.**

6.2.7 Producción de producto.

La materia prima más importante de los módulos fotovoltaicos es el Silicio que se obtiene de la Sílice. Usando el método de reducción se extrae el Silicio, llamado de grado metalúrgico que tiene una pureza del 98%, pero este proceso se repite hasta llegar al 99.99% de pureza. Este último, es llamado Silicio de grado electrónico que es el usado para la fabricación de células fotovoltaicas. (Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume)

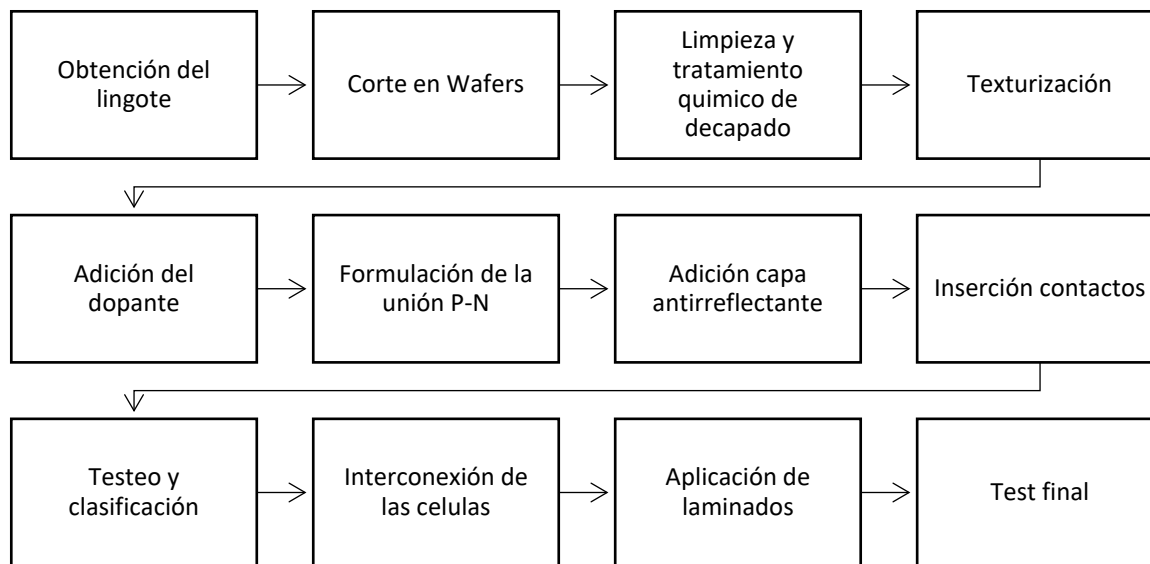


Figura 19 Etapas generales de la fabricación de módulos fotovoltaicos.

Fuente: Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume

Método de cristalización del Silicio policristalino:

A continuación, se describirán las etapas más representativas del proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos policristalinos (Ver Figura 19).

1. Proceso de fundición

El Silicio policristalino se realiza mediante la fundición del material inicial a temperatura de enfriamiento controlada permitiendo así que solidifique en una dirección determinada dentro del molde.

La cristalización del Silicio policristalino provoca que la calidad sea pobre en un comienzo por lo que se hace necesario realizar un proceso intermedio de limpieza de impurezas usando una capa de óxido formado por Fosforo y Aluminio, creando así un campo eléctrico repulsivo (Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume).

2. Corte del lingote de obleas (Wafers)

El lingote se corta en obleas de 250 a 400 μm con hilos de acero inoxidable de entre 150 a 500 μm rociándolos con abrasivo. Con esto se logra una pérdida de 200 a 300 μm de espesor. Este proceso produce unas pérdidas de Silicio de hasta 50% (Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume).

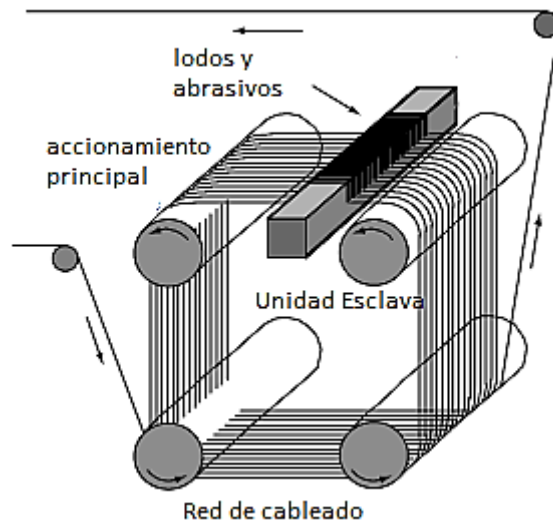


Figura 20 Corte de lingotes de obleas de Silicio.

Fuente: Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume.

3. Adición del dopante.

Previa limpieza de los posibles óxidos superficiales formados en las etapas anteriores, mediante inmersión en HF diluido, aclarado con agua y secado rápido, se procede a proyectar un dopante tipo n (el más comúnmente utilizado es el Fósforo) ya que las obleas suelen ser normalmente de tipo P debido a la introducción de Boro antes de la etapa de cristalización (Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume).

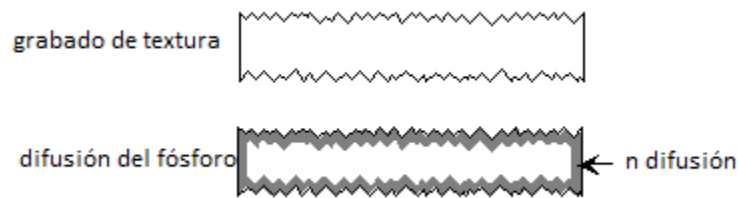


Figura 21 Adición del dopante.

Fuente: Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, Universitat Jaume.

4. Interconexión de las células.

Dependiendo de la potencia final del módulo y del número de células que incluye, estas se suelen agrupar en cadenas de longitud variable y conectarlas en serie o en paralelo dependiendo de los valores de tensión y corriente deseados. Por ejemplo, para un módulo de 36 células conectadas en serie, se disponen las células en 4 filas de 9 células cada una. A continuación, se procede a soldar las dos tiras que vienen de la cara frontal de una célula con la cara posterior de la célula adyacente. Después se colocan las conexiones entre las cuatro tiras y los terminales de salida. Esta operación sigue el esquema de conexionado que muestra la figura 22. (Balenzategui, 2006)

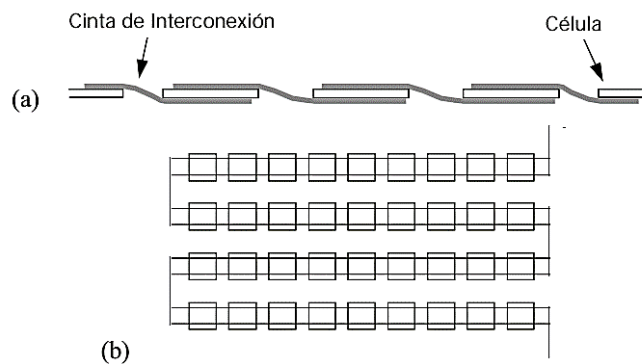


Figura 22 Diagrama de conexión de las células dentro del módulo fotovoltaico

Fuente: (Balenzategui, 2006)

En la figura 2(a) se presenta la forma de interconectar las cintas eléctricas entre sí, del positivo de una célula al negativo de la siguiente; y en la figura 2(b) conexión de las células en un circuito en serie.

5. Laminación y curado.

Se preparan previamente los materiales para la laminación, a saber, el vidrio, el tedlar y el EVA. El EVA es un polímero transparente que funde a relativamente baja temperatura (100°C) y puede solidificar de nuevo al enfriarse. Si se sobrepasan los 150°C durante unos minutos, el proceso ya no es reversible y el EVA no vuelve a comportarse de manera plástica resultando ser un medio de cohesión perfecto para las células. Este proceso es el que se denomina curado del EVA. (Balenzategui, 2006)

El orden de colocación de todos los materiales es: Vidrio-EVA-células-EVA-tedlar, a los que se pueden añadir unas imprimaciones para mejorar su adherencia. El proceso de laminación trata de formar, con estos materiales, un todo compacto sin aire en su interior y con las distintas capas adheridas entre sí. (Balenzategui, 2006)

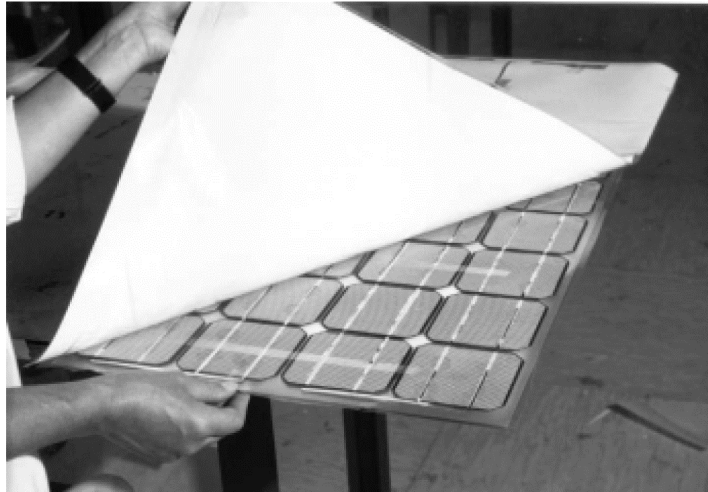


Figura 23 Imagen del proceso de fabricación de un módulo, en el que se puede apreciar la estructura del laminado.

Fuente: (Balenzategui, 2006)

6. Enmarcado y colocación de caja de conexiones.

A continuación, se añade al laminado un marco de aluminio que protege su perímetro de posibles golpes y de la humedad y le confiere una estructura manejable y de fácil instalación. La canaleta del marco de aluminio que va a alojar el laminado (los cuatro

laterales) se rellena con silicona, se adhiere al laminado y luego se atornillan los cuatro bordes entre sí.

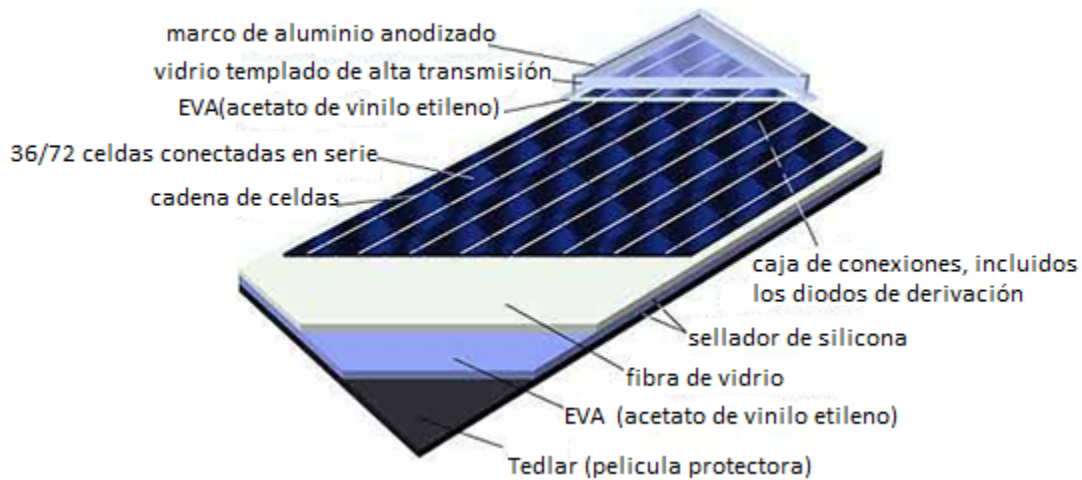


Figura 24 Partes que conforman un módulo fotovoltaico.

Fuente: (Balenzategui, 2006)

Luego, se añade una caja de conexiones al módulo. La caja se sujeta al marco por la parte en donde salen los terminales de la interconexión. De la interconexión salen tres terminales, dos de los extremos y otro correspondiente al punto medio. Finalmente se procede a medir los módulos en condiciones estándar en un simulador solar, clasificándolos de acuerdo con la potencia que alcanza.

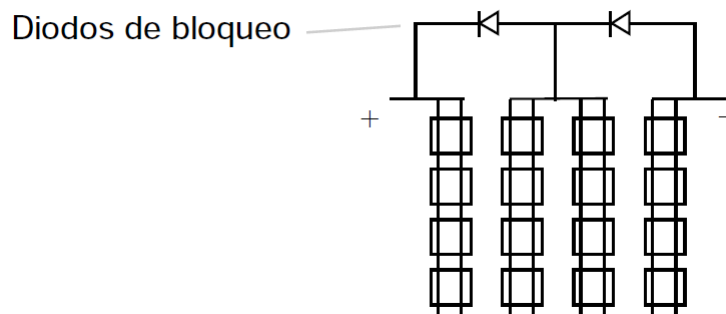


Figura 25 Intersección de diodos de bloqueo en el conexionado del módulo.

Fuente: (Balenzategui, 2006)

6.2.8 Fase de uso.

En esta fase del ciclo de vida del panel fotovoltaico cumplen con su operación o puesta en servicio. Dentro de esta fase el panel necesita mantenimiento e inspecciones periódicas para asegurar su correcto funcionamiento durante su vida útil.

6.2.9 Operación y Mantenimiento.

Los módulos fotovoltaicos en la etapa de operación necesitan mantenimiento y en este apartado se describirá brevemente los aspectos más importantes que se deben de tener en cuenta en esta etapa.

1. Inspección visual.

La inspección visual es la prueba más básica y de menor costo que tiene por objetivo verificar, mediante el ojo humano y la ayuda de instrumentos de iluminación y aumento de visión, el correcto estado externo e interno de un equipo y sus componentes. La inspección visual puede ser directa, indirecta o remota. (Novoa, 2015)

2. Criterio de Evaluación

El equipo o componente inspeccionado no debe presentar daños visibles, anomalías o desperfectos. El criterio de evaluación se basa en este caso en la experiencia y conocimiento del equipo, es vital conocer el estado del equipo al momento de la instalación para compararlo con su estado actual (Novoa, 2015)

3. Medición de parámetros meteorológicos de operación.

Las actividades de mantenimiento deben ejecutarse bajo condiciones meteorológicas óptimas a fin de que no afecten al equipo intervenido ni a ninguno de sus componentes.

Las condiciones medioambientales de mayor relevancia que deben verificarse antes de realizar algún tipo de mantenimiento en los equipos son:

- Medición de temperatura del módulo o ambiente.
- Medición de irradiación solar.
- Medición de la velocidad del viento y su dirección.

- Medición de la humedad relativa.

La medición y monitoreo de la mayoría de estos y otros parámetros meteorológicos están considerados generalmente en la estación meteorológica de monitoreo (Novoa, 2015)

Se debe considerar los siguientes criterios que afectan a las labores de mantenimiento:

A. Temperatura

- La temperatura del equipo y de los componentes inspeccionados no debe superar su límite térmico ya que a partir de este el equipo puede fallar, dicho límite se establece en las especificaciones del fabricante. A un equipo o componente que opera por sobre los límites de temperatura se lo conoce como punto caliente y deberá analizarse los motivos del problema y sus soluciones (Novoa, 2015).
- Durante las labores de mantenimiento no se debe tocar equipos o componentes que trabajen o se encuentren a temperaturas superiores a los 40 °C. (Novoa, 2015)
- La temperatura influye directamente sobre la humedad relativa, debido a esto es necesario considerar, durante las labores de mantenimiento, que por efectos de temperatura se pueda dar lugar a condensación del agua dentro de los equipos (Novoa, 2015).

B. Irradiación Solar

- No instale en zonas expuestas al sol aquellos equipos que no soportan la irradiación solar. (Novoa, 2015)
- La medición de irradiación solar, desde el punto de vista de rendimiento, debe permitir comprobar el índice rendimiento de una central fotovoltaica y este índice no debe estar lejano al de diseño (Novoa, 2015).

- La medición de irradiación solar, desde el punto de vista de mantenimiento, sirve para comprobar el cumplimiento de las condiciones bajo las cuales se deben realizar las pruebas en los paneles fotovoltaicos y piranómetros. (Novoa, 2015)

C. Velocidad del Viento

- La velocidad del viento no debe ser tan elevada como para generar carga, debida a la presión del viento, superior a la soportada por los paneles fotovoltaicos y demás equipos de una central fotovoltaica. La carga por viento o por hielo soportada es determinada por el fabricante. (Novoa, 2015)
- La velocidad del viento no debe ser tan elevada durante las labores de mantenimiento ya que puede levantar polvo, mismo que puede ingresar al equipo intervenido (Novoa, 2015).
- La velocidad del viento se debe comprobar como requisito de otras pruebas en los equipos de una central fotovoltaica (Novoa, 2015).

D. Humedad relativa

- El límite de humedad relativa es determinado por el fabricante de cada equipo, los equipos con elementos electrónicos son los más sensibles a la humedad, en este caso los inversores, razón por la cual se recomienda no abrir los equipos si se supera el 80% de humedad relativa del ambiente (Novoa, 2015)
- No se deben realizar labores cuando la temperatura del medio es superior a la del punto de rocío ya que el vapor de agua puede condensarse interna y externamente en los equipos intervenidos (Novoa, 2015).

6.2.9.1 Pruebas mecánicas.

Las pruebas mecánicas son aquellas que se realizan con el objetivo de comprobar las características mecánicas de los módulos fotovoltaicos. Entre las más representativas están (Novoa, 2015):

- Medición del par de apriete.
- Termografía en paneles.

1. Medición del par de apriete.

La medición del par de apriete permite comprobar que el torque de apriete de los elementos de sujeción, la tornillería, por ejemplo, cumpla con los pares de apriete establecidos por el fabricante. La primera medición del par de apriete se realiza en la etapa de instalación y puesta en marcha de la central fotovoltaica, luego debido a la operación de la central y a sus condiciones de funcionamiento el par de apriete cambia respecto al de instalación, por lo cual es necesario verificarlo. (Novoa, 2015)

La variación del par de apriete en los elementos de sujeción puede deberse a:

- Vibraciones.
- Dilatación de los materiales debido a la circulación de corriente.
- Instalación inadecuada.
- Defectos de fábrica, entre otras. (Novoa, 2015)

2. Termografía en paneles.

La termografía de paneles es una prueba que se usa para determinar el estado funcional de los paneles fotovoltaicos y en específico de cada célula fotovoltaica, para esto se utiliza una cámara termográfica que permite medir la temperatura de los paneles en su totalidad, basándose en los rayos infrarrojos que cada material emite según la temperatura que posee. (Novoa, 2015)

El objetivo de la termografía en los paneles es determinar los llamados “puntos calientes” que son aquellas células fotovoltaicas que por algún motivo han operado en su zona de polarización inversa y han cambiado su característica generadora y han pasado a funcionar como una carga. En el caso de que una célula fotovoltaica esté dañada, dependiendo de la configuración de conexión entre células fotovoltaicas, el arreglo de paneles puede reducir su producción o dejar de producir por completo. (Novoa, 2015)

- **Limpieza de paneles fotovoltaicos.**

La limpieza de los paneles consiste en el retiro de suciedad acumulada sobre los paneles. La frecuencia de la limpieza debe definirse juntamente con el análisis de contaminación ambiental de la zona. Se recomienda realizar la limpieza (usando agua) cuando el cristal del panel no sobrepase los 25 °C para evitar choque térmico y pérdidas leves de producción. (Novoa, 2015)

Considerando los cuidados explicados la limpieza de paneles se puede realizar mediante las siguientes metodologías (Novoa, 2015):

- Metodología sin agua.
- Metodología manual con agua.
- Metodología mecanizada con agua.
- Autolimpieza

6.3 Fin del ciclo de vida.

El fin del ciclo de vida de un panel fotovoltaico comprende dos etapas principales: reciclaje o disposición final y recolección de materiales reciclados.

Los requisitos de tratamiento al final de la vida útil para los paneles fotovoltaicos en todo el mundo están fijados por la normativa de residuos que se aplica de forma genérica a cualquier residuo en lugar de los dedicados a la energía fotovoltaica.

6.3.1 Clasificación de los desechos los desechos fotovoltaicos.

La normativa sobre residuos se basa en la clasificación de los residuos. Esta clasificación se configura en función de la composición de los residuos, en particular de cualquier componente que se considere peligroso (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Una descripción general de la clasificación mundial de residuos fotovoltaicos, que varía ampliamente. Los materiales que conforman un panel fotovoltaico y la clasificación de los residuos determinan las vías de tratamiento y eliminación requeridas para los paneles fotovoltaicos cuando los países no poseen regulación específica existente (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Como se describió la sección 4.8.4, países como Estados Unidos, Alemania y Japón han categorizado los desechos de paneles fotovoltaicos usando la prueba de lixiviación para categorizar los residuos de paneles como peligrosos o no, por ejemplo, el umbral para la concentración de lixiviados de plomo que permite clasificar un panel como peligroso es de 5 miligramos por litro (mg/l) en EE. UU. y de 0,3 mg/l en Japón. Para el cadmio, el umbral de peligrosidad es de 1 mg/l en EE. UU., 0,3 mg/l en Japón y 0,1 mg/l en Alemania (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

6.3.2 Tratamiento actual de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil

En la actualidad, la mayoría de los países del mundo clasifican los módulos fotovoltaicos como residuos generales o industriales, mientras que la Unión Europea ha adoptado normativas específicas sobre residuos fotovoltaicos. Aunque actualmente solo existen cantidades moderadas de residuos fotovoltaicos en el mercado global de residuos, las plantas dedicadas de reciclaje de módulos fotovoltaicos ya están en funcionamiento, y la combinación de volúmenes bajos al final de su vida útil con devolución de garantía y reciclaje de chatarra de producción justifica su operación (IEA-PVPS-Task12).

El flujo general del proceso de tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil puede dibujarse como se muestra en la Figura 26. Los residuos de módulos

fotovoltaicos utilizados en las instalaciones y en los centros de fabricación, por ejemplo, se transportan a plantas operadas por recicladores o procesadores intermedios. En las plantas, se utilizan procesos intermedios para separar los materiales valiosos contenidos en los módulos fotovoltaicos, como el vidrio, los metales y sus compuestos.

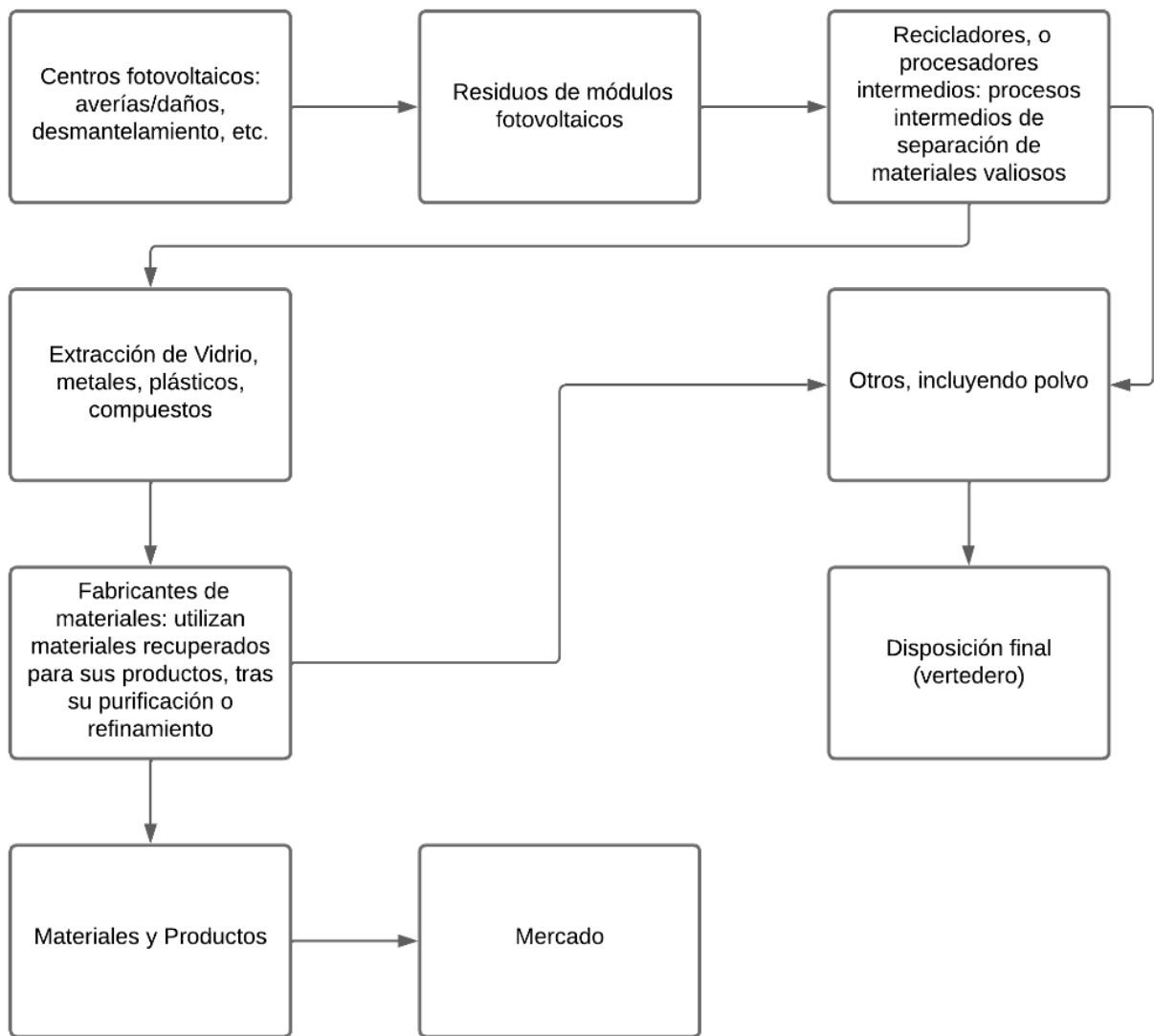


Figura 26 Flujo general del tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil

Fuente: (IEA-PVPS-Task12).

Los materiales valiosos recuperados se utilizan como materiales secundarios para los productos tras su purificación y refinado por parte de los fabricantes de materiales. Puede

haber un camino hacia la implementación de procesos intermedios adicionales antes del tratamiento por parte de los fabricantes de materiales si es necesario, dependiendo del nivel de separación en el primer proceso intermedio. Por otra parte, los materiales no valiosos o de escaso valor, incluido el polvo, que generan los recicladores, los procesadores intermedios y los fabricantes de materiales pueden ser eliminados en vertederos. Hay que tener en cuenta que, durante el flujo de tratamiento, algunos materiales como los polímeros pueden ser tratados térmicamente, y el calor se recupera luego como combustible durante los procesos avanzados (IEA-PVPS-Task12).

6.3.3 Ejemplo de tratamiento de módulos Silicio Cristalino (c-Si).

Para la recuperación y el reciclaje de los materiales utilizados en los módulos fotovoltaicos, el primer paso es la separación de los principales componentes, como las estructuras laminadas, los marcos metálicos y las cajas de terminales (cables y polímeros). El aluminio o el acero de los marcos y el cobre de los cables pueden formar parte de los circuitos de reciclaje de metales ya establecidos y, por tanto, tienen potencial para ser reciclados fácilmente. A continuación, el proceso más importante y técnicamente difícil es la separación de las estructuras laminadas compuestas por vidrio, células fotovoltaicas de Si y capas de polímero (IEA PVPS Task 12).

En Europa, más de 15,000 toneladas de residuos de módulos fotovoltaicos fueron recogidos a finales de 2016 por PV CYCLE, y la mayoría de ellos eran módulos fotovoltaicos basados en Silicio. La mayoría de estos módulos son tratados por recicladores de vidrio, ya que el reciclaje del componente de vidrio laminado de los módulos de c-Si es un proceso relativamente barato que las empresas de reciclaje de vidrio plano de vidrio plano pueden llevar a cabo con poca inversión adicional. Tras el proceso de recuperación del vidrio, otros materiales, como los metales y otros compuestos, son tratados por otros procesadores. La fracción de vidrio triturado resultante, que todavía puede estar muy contaminada con silicio, polímeros y metales, puede mezclarse con otro vidrio reciclado como material aislante térmico en las industrias de espuma de vidrio o de fibra de vidrio. Sin embargo, con el aumento de los flujos de

residuos fotovoltaicos, este mercado puede saturarse y será necesario invertir en nuevas tecnologías de reciclaje. En otros países, algunos metales valiosos, como la plata, son recuperados por procesadores intermedios, además del vidrio, por razones técnicas y/o económicas. (IEA PVPS Task 12).

6.4 Tendencias en la I+D tecnológica para el reciclaje de módulos fotovoltaicos

La investigación y desarrollo (I+D) se lleva a cabo en algunos países desde hace veinte o más años. En un principio el reciclaje de c-Si (Silicio Policristalino) se centraba en la recuperación de células/hojas de Silicio para reducir los costes de producción. Posteriormente, la recuperación de materiales de alto valor y peligrosos pasó a ser prioridad. En la tabla 17 se describe la evolución de las tendencias del reciclaje de Silicio Policristalino entre 1990 y 2010.

Tabla 17 Cambios en los objetivos y motivaciones para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.

Año		Tendencia
1990		Recuperación de las obleas de Silicio (Si) sin rotura, ya que el coste del módulo era muy elevado y estaba dominado por el coste de la célula de Si
2000	Primera mitad	Además de las obleas de Silicio (Si), la recuperación de Plata (Ag) debido valor, y la recuperación de Plomo (Pb) debido a cuestiones medioambientales
	Segunda mitad	La recuperación del vidrio es también una preocupación importante para aumentar la eficacia de la utilización de los recursos, y para aumentar la tasa de recuperación/reciclaje (% en peso)
2010		La recuperación de los componentes de alto peso, como el vidrio, a un coste menor es un objetivo importante. Por otra parte, los componentes valiosos de bajo peso pueden recuperarse si se justifica económicamente. La recuperación de los metales a un coste menor será probablemente una de las principales preocupaciones.

Fuente: (IEA PVPS Task 12).

6.5 Inventario del ciclo de vida.

La fase de inventario del ciclo de vida implica la unión de datos de entradas de materiales, energía, emisiones y salidas de productos para el ciclo de vida completo del sistema bajo análisis. Para la evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos, estos datos se recopilan o modelan por separado para los módulos fotovoltaicos y el balance del sistema (BOS). (IEA PVPS Task 12).

Las entradas y salidas de material y energía durante la fabricación de módulos fotovoltaicos se obtuvieron de la producción de plantas fotovoltaica. (IEA PVPS Task 12).

El grosor típico de la oblea fotovoltaica multi- y mono-Si es de 180 y 170 μm , respectivamente; Se supone que 60 celdas individuales de 243 cm^2 (156 mm x 156 mm) componen un módulo de 1,6 m^2 para todos los tipos de c-Si (Silicio policristalino). Si bien existe una variedad de arquitecturas de celdas y tamaños de módulos en el mercado fotovoltaico actual, los datos del inventario del ciclo de vida para la producción de celdas, laminados y paneles se normalizan por unidad de área (m^2). La eficiencia de conversión del módulo multi- y mono-Si se toma como 18.0% y 19.5%, respectivamente (IEA PVPS Task 12).

Para la energía fotovoltaica de película delgada, a partir de 2015, First Solar fabricó módulos fotovoltaicos de CdTe de vidrio doble y sin marco de 1,2 m por 0,6 m, que tienen una eficiencia de conversión nominal del 15.5 % con una capa activa de $\sim 3 \mu\text{m}$ de espesor. En 2017-2018, la eficiencia de conversión aumentó al 17.5 % para módulos de CdTe de doble vidrio con marco de 2.005 m por 1.230 m con una capa activa de $\sim 3 \mu\text{m}$ de espesor. Ahora tienen una eficiencia de conversión del 18 %, que se utiliza en este informe de LCI. La eficiencia del panel CIGS es del 15-17 % y se toma como 16 % en este informe de LCI. Aunque está más allá del alcance de este informe, los módulos mono-Si basados en emisor pasivado y contacto posterior (PERC), hetero unión (HJT) y tecnología de contacto posterior Inter digitado (IBC) pueden tener una eficiencia de conversión de $\geq 20 \%$ (IEA PVPS Task 12).

Cristalino-Si PV

Los parámetros clave del Inventario del Ciclo de Vida (LCI) de la cadena de suministro de los módulos de silicio cristalino, que abarcan la purificación de la materia prima del silicio policristalino, la cristalización, el barnizado, el procesamiento de las células y el ensamblaje de los módulos (IEA PVPS Task 12).

El silicio de grado metalúrgico que se extrae del cuarzo se purifica para convertirlo en polisilicio de grado solar mediante un proceso basado en silano (SiH_4) o triclorosilano (SiHCl_3). La necesidad de energía para este paso de purificación es significativa para los módulos fotovoltaicos de Si cristalino. El método del reactor Siemens representa la mayor parte de la producción de silicio de grado solar, en el que el gas silano o triclorosilano se introduce en un horno de descomposición térmica (reactor) con varillas de polisilicio a alta temperatura ($\sim 1100\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$). Las varillas de silicio crecen a medida que los átomos de silicio del gas se depositan en ellas, hasta 150 mm de diámetro y hasta 150 cm de longitud (IEA PVPS Task 12).

La mayoría de los módulos de silicio necesitan un marco de aluminio de 2.1 kg por m^2 para que sean robustos estructuralmente y se puedan instalar con facilidad, mientras que un soporte de vidrio cumple las mismas funciones para los módulos fotovoltaicos sin marco. (IEA PVPS Task 12).

CAPÍTULO 7 CASO DE ESTUDIO

7.1 Encuesta

La información fue recogida de modo estandarizado mediante un cuestionario de 24 preguntas cerradas a once administradores de plantas solares.

La muestra consta de 11 plantas fotovoltaicas ubicadas en diferentes puntos al interior de El Salvador: Planta Fotovoltaica Textufile ubicada en Soyapango (2.5MW), Planta Fotovoltaica Providencia Solar ubicada en La Paz (101 MW), Planta Fotovoltaica Peña Moreno ubicada en San Salvador (0.48MW), Planta Fotovoltaica Las Mesas ubicada en San Miguel (16MW), Planta Fotovoltaica Capella Solar ubicada en Usulután (140 MW), Planta Fotovoltaica El Ángel ubicada en Apopa (13.7MW), Planta Fotovoltaica envasadora Jordán ubicada en San Miguel (0.66MW), Planta Fotovoltaica Plan Solar ubicada en Acajutla (2.7 MW), Planta Fotovoltaica UCA ubicada en Antiguo Cuscatlán (0.46MW), Planta Fotovoltaica Trinidad ubicada en Acajutla (8MW), Planta Fotovoltaica Bósforo Jiquilisco ubicada en Jiquilisco (10MW).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

PREGUNTA 1. Indique nombre de la planta fotovoltaica

Tabla 18 Nombre de las plantas fotovoltaicas incluidas en el estudio.

ITEM	Nombre de la Planta
1	Textufile
2	Providencia Solar
3	Peña Moreno
4	Las Mesas
5	Capella Solar
6	El Ángel
7	Envasadora Jordán
8	Plan Solar
9	Planta Solar UCA
10	Trinidad
11	AES Bosforo Jiquilisco

PREGUNTA 2. Indique ubicación de la planta fotovoltaica

Tabla 19 Ubicación de plantas fotovoltaicas incluidas en el estudio.

ITEM	Nombre de la Planta	Ubicación
1	Textufile	Soyapango
2	Providencia Solar	La Paz
3	Peña Moreno	San Salvador
4	Las Mesas	San Miguel
5	Capella Solar	Usulután
6	El Ángel	Apopa
7	Envasadora Jordan	San Miguel
8	Plan Solar	Acajutla
9	Planta Solar UCA	Antiguo Cuscatlán
10	Trinidad	Acajutla
11	AES Bosforo Jiquilisco	Jiquilisco

La zona oriente del país es la que refleja mayor presencia de plantas fotovoltaicas seguido por la zona central.

PREGUNTA 3. Indique el periodo en el que fue inaugurada la planta fotovoltaica.

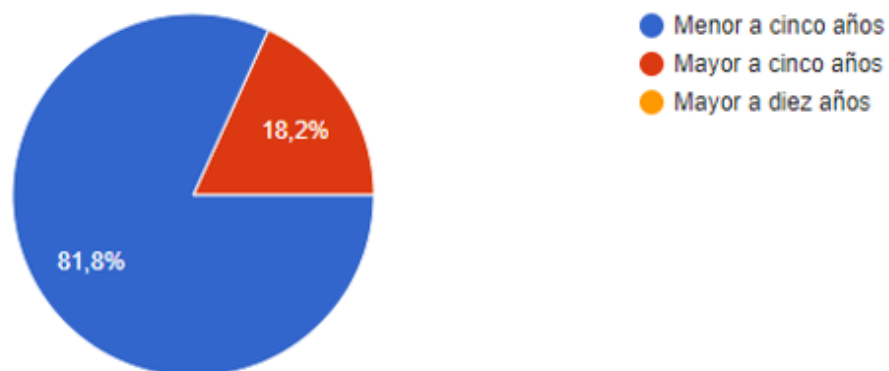


Figura 27 Tiempo de operación de plantas solares fotovoltaicas.

Más de tres cuartos del total representan plantas menores a cinco años de operación seguido de 23.1% de plantas mayores a cinco años de operación.

PREGUNTA 4. Indique la potencia instalada en la planta fotovoltaica.

Tabla 20 Capacidad nominal de plantas fotovoltaicas.

ITEM	Nombre de la Planta	Ubicación	Capacidad
1	Textufile	Soyapango	2.5MW
2	Providencia Solar	La Paz	101MW
3	Peña Moreno	San Salvador	0.48MW
4	Las Mesas	San Miguel	16MW
5	Capella Solar	Usulután	140MW
6	El Angel	Apopa	13.7M
7	Envasadora Jordan	San Miguel	0.66MW
8	Plan Solar	Acajutla	2.7MW
9	Planta Solar UCA	Antiguo Cuscatlán	0.45MW
10	Trinidad	Acajutla	8MW
11	AES Bosforo Jiquilisco	Jiquilisco	10MW

PREGUNTA 5. Indique la o las marcas de módulos fotovoltaicos que se encuentran instalados en la planta fotovoltaica:

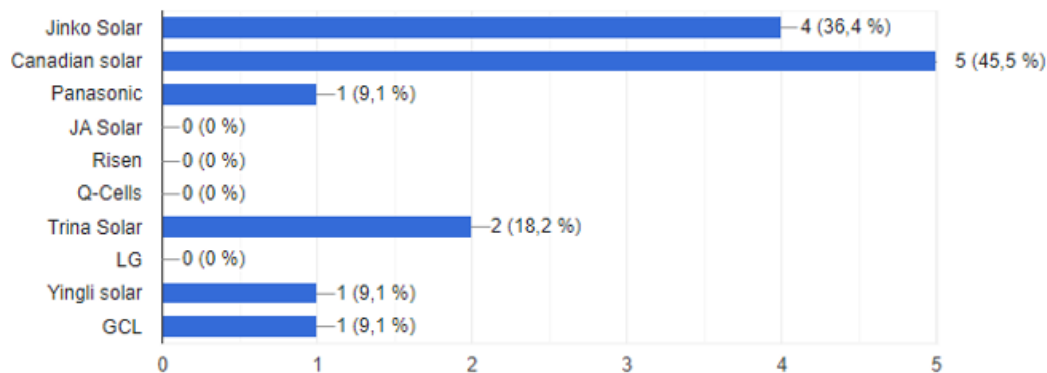


Figura 28 Marcas de fabricantes de módulos fotovoltaicos

La marca Canadian Solar es la que predomina sobre otras marcas de origen asiático.

PREGUNTA 6. Indique la potencia de los módulos fotovoltaicos de la planta.

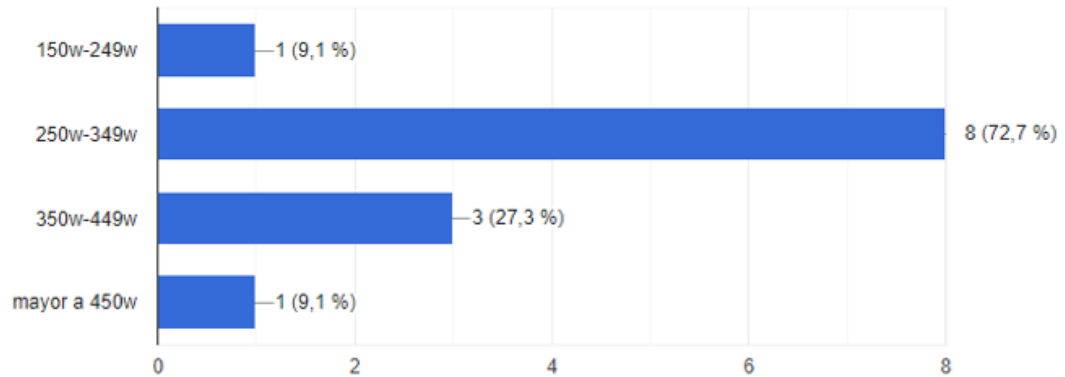


Figura 29 Potencias nominales de módulos fotovoltaicos

El rango de potencia que predomina entre las plantas fotovoltaicas analizadas es la de 250W a 349W

PREGUNTA 7. Indique el o los tipos de módulos instalados en su planta fotovoltaica.

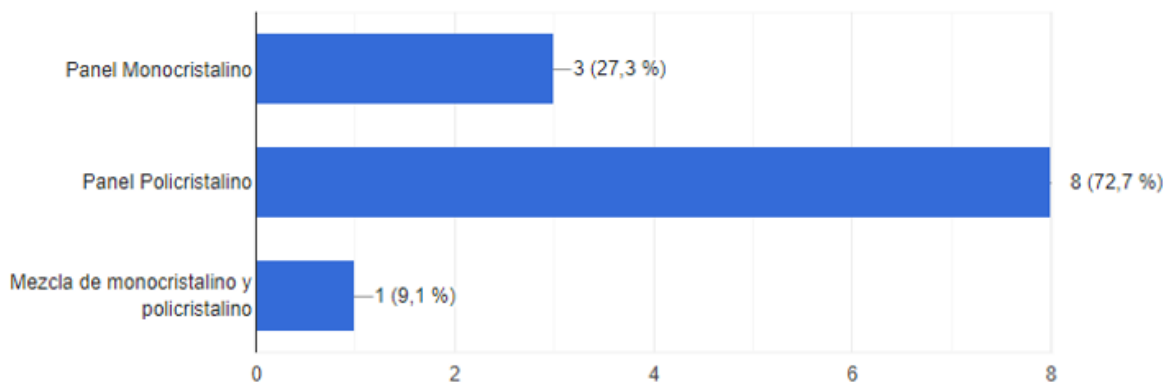


Figura 30 Tipos de tecnología en módulos fotovoltaicos

Nueve de las plantas consultadas presentan en sus instalaciones Paneles del tipo Policristalino, seguido de paneles monocristalinos y con una menor presencia la mezcla de ambos tipos.

PREGUNTA 8. Indique el tipo de montaje de los módulos fotovoltaicos de la planta.

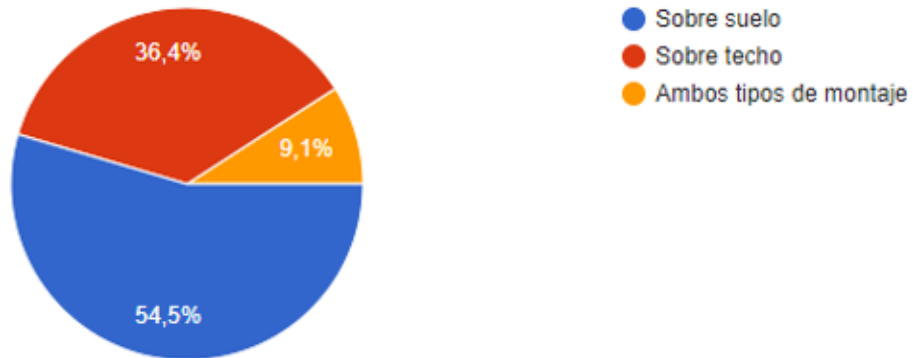


Figura 31 Tipos de estructuras de montaje de módulos fotovoltaicos.

Más de la mitad de las plantas fotovoltaicas analizadas presentan instalaciones sobre suelo seguidamente de las instalaciones sobre techo.

PREGUNTA 9. Indique qué tipo de sistema de soporte presenta la planta fotovoltaica.

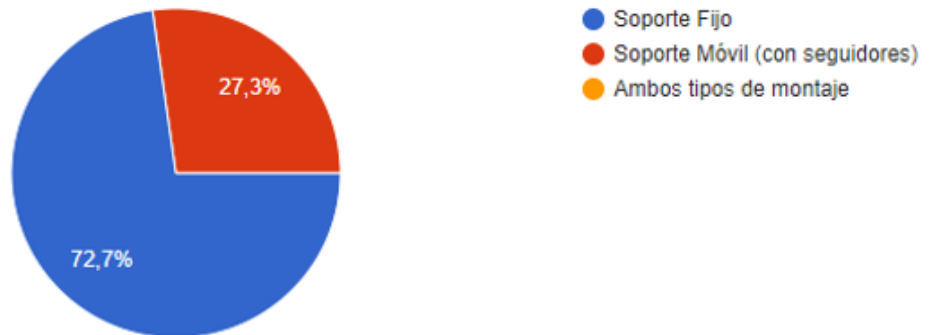


Figura 32 Tipos de sistema de soporte de placas fotovoltaicas

Predominan las plantas fotovoltaicas de soporte fijo sobre las plantas con soporte móvil y las que tienen ambos sistemas implementados.

PREGUNTA 10. ¿Actualmente la planta fotovoltaica presenta módulos fotovoltaicos con fallas?

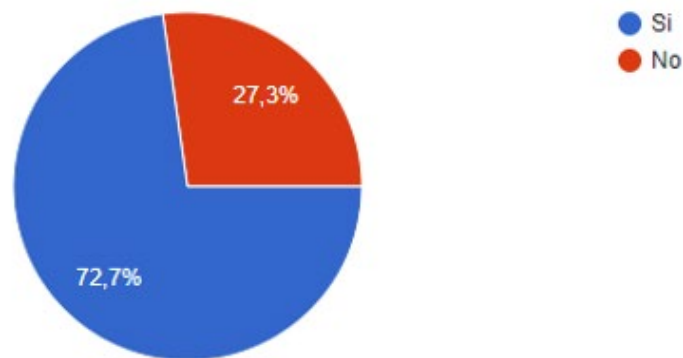


Figura 33 Porcentaje de plantas que poseen reporte de fallas en módulos fotovoltaicos

Solo el 15% de las plantas fotovoltaicas analizadas no presenten fallas en sus módulos.

PREGUNTA 11. Con que frecuencia se registran fallas en los módulos fotovoltaicos.

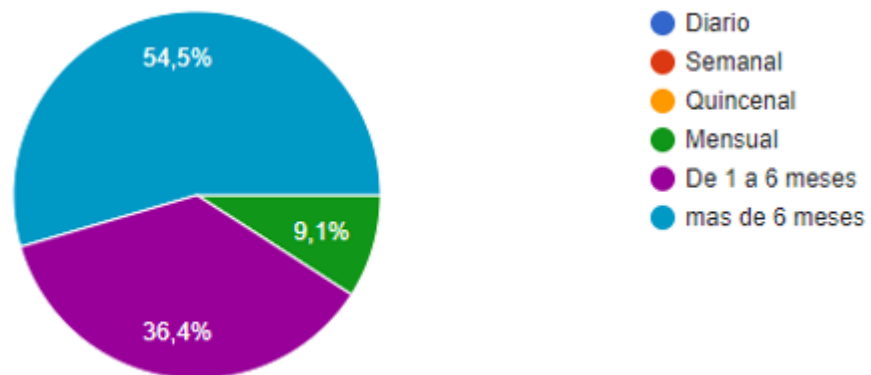


Figura 34 Porcentaje de frecuencia con que se registran fallas en módulos fotovoltaicos en plantas fotovoltaicas

Un 38.5% representan a plantas que reflejan fallos en periodo de seis meses seguidamente de registros que suceden en periodos mayores a seis meses.

PREGUNTA 12. De los siguientes tipos de fallas tempranas, indique cual o cuales se han presentado en la planta.

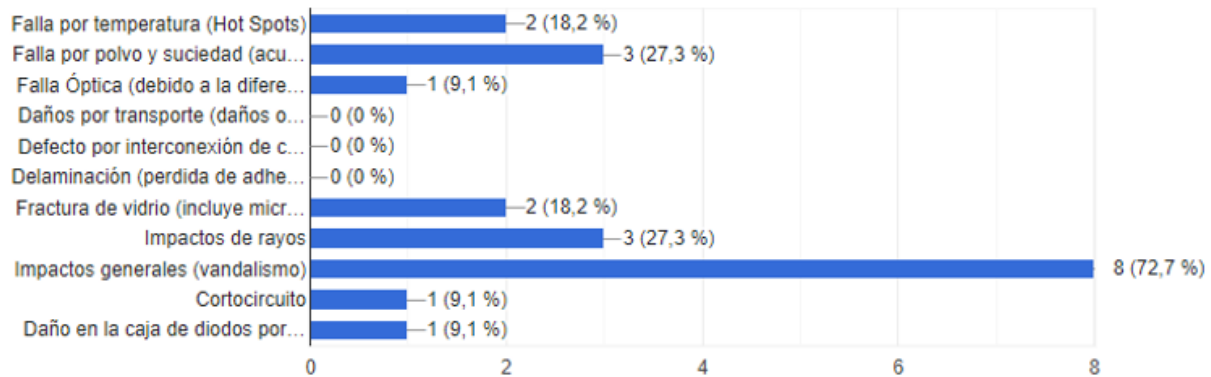


Figura 35 Tipos de fallas en módulos fotovoltaicos que se han presentado con mayor frecuencia en las plantas fotovoltaicas.

La falla que predomina es la de impactos generales debido al vandalismo seguidamente de las fallas por impacto de rayos.

PREGUNTA 13. La garantía de los módulos fotovoltaicos ¿incluye el servicio de disposición final de los mismos?

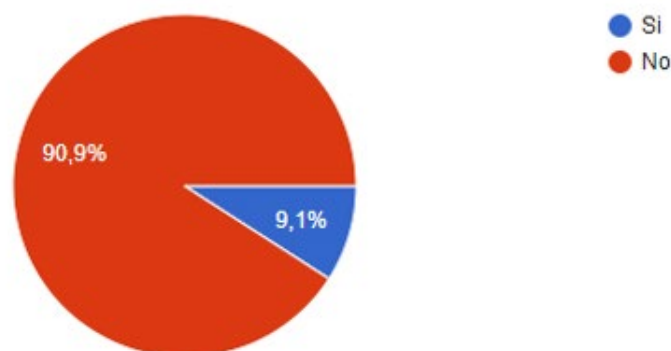


Figura 36 Alcance de las garantías de los módulos fotovoltaicos con respecto a la disposición final.

Más del 90% de las plantas analizadas confirman que la disposición final de módulos fotovoltaicos no está incluida en la garantía.

PREGUNTA 14. Según su conocimiento, de que se trata la disposición final de módulos fotovoltaicos.



Figura 37 Conceptualización de la disposición final de módulos fotovoltaicos de los administradores de plantas fotovoltaicas.

La opinión que predomina es la recuperación de materiales de fabricación de paneles.

PREGUNTA 15. ¿Cuenta su empresa o institución con un proceso de manejo de residuos de módulos fotovoltaicos?

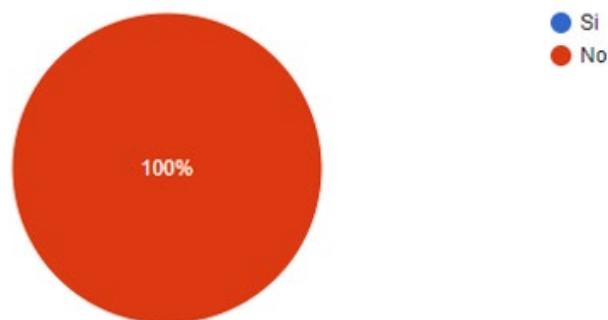


Figura 38 Empresas que cuentan con procesos de manejo de residuos de módulos fotovoltaicos

Todos afirma que no poseen procesos referentes a manejos de residuos en sus plantas fotovoltaicas.

PREGUNTA 16. Indique si en sus instalaciones se cuenta con un espacio adecuado para el almacenamiento de módulos fotovoltaicos con falla. SI su respuesta es NO pasar a pregunta 18.

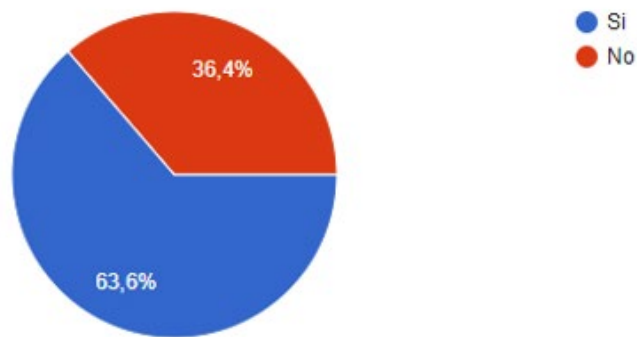


Figura 39 Empresas que poseen espacio asignado para almacenamientos de módulos fotovoltaicos

Más de la mitad de las empresas consultadas confirman que sí poseen un espacio específico para almacenar módulos fotovoltaicos con fallas.

PREGUNTA 17. Indique que tipo de espacio se encuentra adecuado para el almacenamiento de módulos fotovoltaicos.

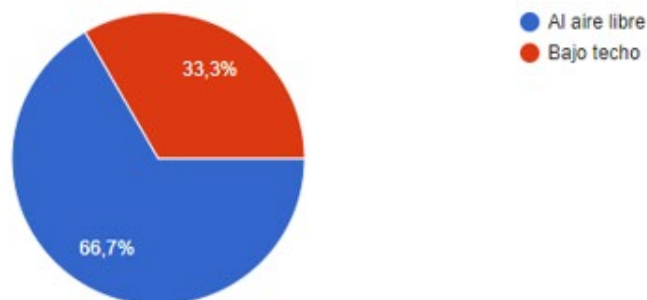


Figura 40 Condiciones físicas del espacio destinado para almacenamiento de módulos fotovoltaicos en plantas fotovoltaicas.

El almacenamiento en un espacio al aire libre es que predomina por las empresas que no poseen un espacio adecuado para su almacenamiento.

PREGUNTA 18. Indique si su empresa o institución cuenta con un procedimiento de disposición final de módulos fotovoltaico con falla.

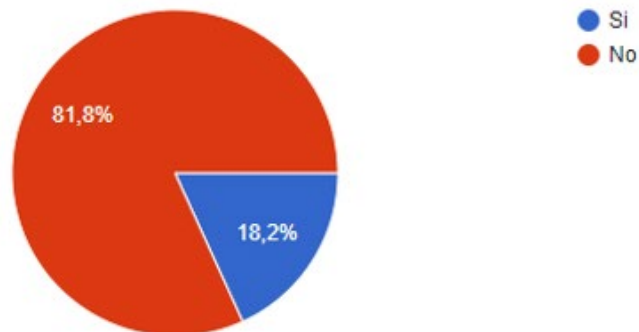


Figura 41 Empresas que poseen procedimientos de disposición final de módulos fotovoltaicos.

Más del 80% de las empresas analizadas no cuentan con un proceso mientras que un 15% afirma que sí poseen procesos para la disposición final de módulos fotovoltaicos.

PREGUNTA 19. ¿Conoce empresas locales que brinden el servicio de tratamiento de disposición final de módulos fotovoltaicos?

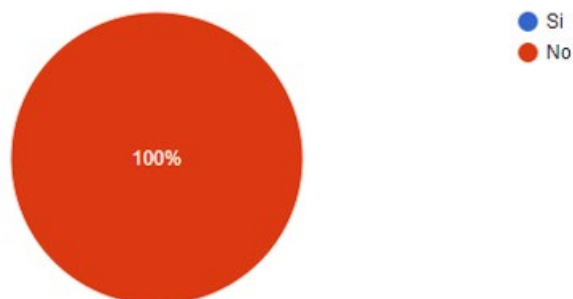


Figura 42 Conocimiento sobre empresas locales que brinden el servicio de disposición final de módulos fotovoltaicos.

Todas consultadas afirman que no tienen conocimiento de compañías locales que brinden servicios de tratamiento de disposición final de módulos fotovoltaicos.

PREGUNTA 20. ¿Conoce empresas extranjeras que brinden el servicio de tratamiento de disposición final de módulos fotovoltaicos?

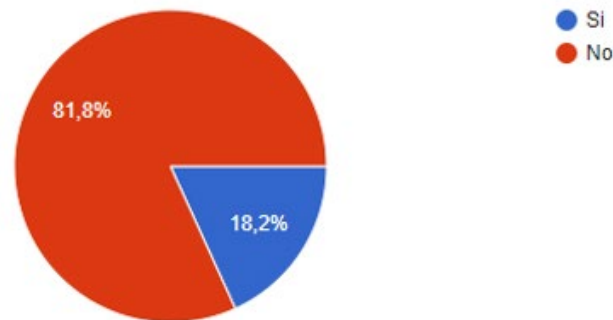


Figura 43 Conocimiento sobre empresas extranjeras que brinden el servicio de disposición final de módulos fotovoltaicos

La mayoría de las empresas consultadas afirman que no tienen conocimiento de compañías extranjeras que brinden servicios de tratamiento de disposición final de módulos fotovoltaicos.

PREGUNTA 21. El ciclo de vida describe las etapas que tiene el módulo fotovoltaico desde la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil, ¿Considera que agrega valor para su empresa poder dar cumplimiento a cerrar este ciclo de vida mediante la disposición final de los módulos fotovoltaicos?

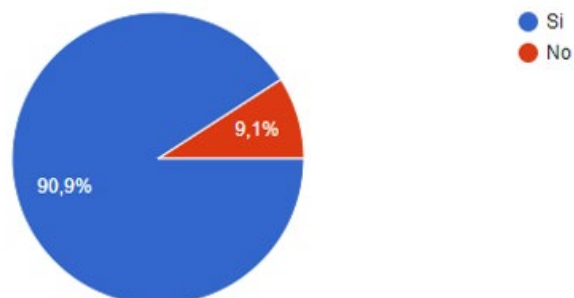


Figura 44 Conceptualización del ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos

Más del 90% de las empresas afirman que culminar el cierre del ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos agrega valor a su compañía frente a un 9% que considera que no aporta valor a su empresa.

PREGUNTA 22. El Salvador no cuenta con leyes específicas para el tratamiento o disposición final de módulos fotovoltaicos, ¿Desde su punto de vista, la creación de leyes para la disposición final de módulos fotovoltaicos mejoraría en su empresa la gestión de estos residuos?

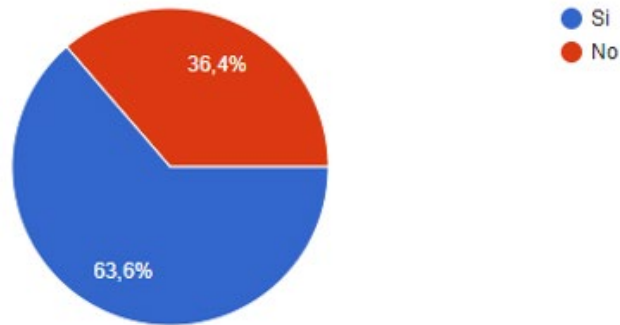


Figura 45 La incidencia de la aplicación de leyes sobre disposición final de módulos fotovoltaica.

Más del 60% de empresas consultadas afirma que la aplicación de las leyes de disposición de final de módulos fotovoltaicos mejoraría la gestión de residuos en sus compañías.

PREGUNTA 23. ¿Considera que es importante brindar tratamiento final a los módulos fotovoltaicos con falla?

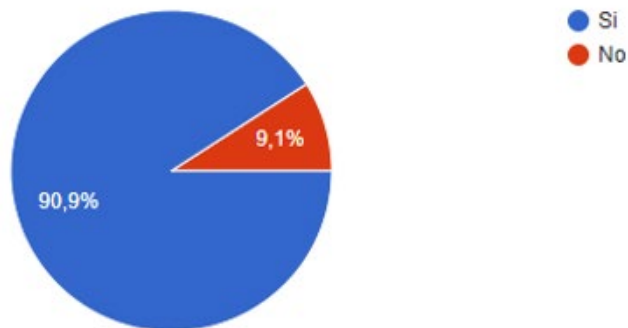


Figura 46 Consulta de la importancia del tratamiento final de módulos fotovoltaicos

Más del 90% de las empresas consultadas afirman que consideran importante la aplicación de tratamiento de disposición final de los módulos fotovoltaicos.

PREGUNTA 24. Indique que rango de precio por modulo fotovoltaico considera que es el adecuado para brindar un adecuado tratamiento de disposición final de módulos fotovoltaicos con falla. (recolección de módulos fotovoltaicos, transporte hasta puerto, flete hasta país destino, certificado de destrucción y reciclaje)

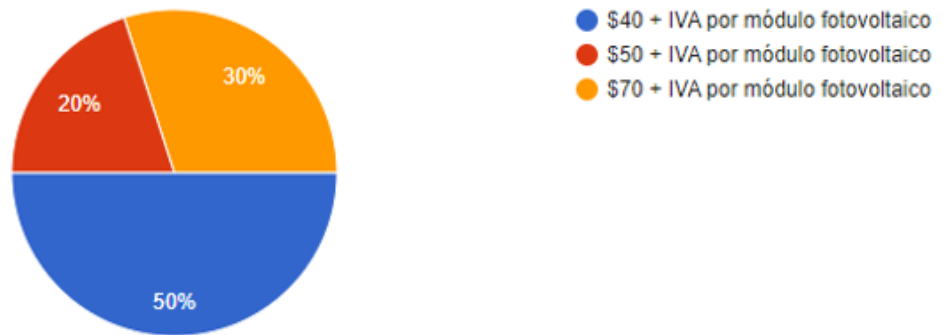


Figura 47 Rangos de precios considerados adecuados para la disposición final de paneles fotovoltaicos

De los 3 rangos consultados el que posee mayor aceptación es la referida al costo menor (\$40 + IVA) y el que posee menor aceptación es el de mayor costo por modulo fotovoltaico (\$ 70 + IVA)

7.2 Entrevistas.

Como parte de las herramientas de recolección de datos para la presente investigación se consideró la aplicación de la entrevista semiestructurada a dos profesionales con amplia experiencia en la administración de plantas fotovoltaicas en el país.

Esta herramienta permite mantener el enfoque cualitativo para el análisis de la información debido a las preguntas serán una combinación entre preguntas abiertas y cerradas lo que permite que el entrevistado poder explayarse en mayor medida de acuerdo con su conocimiento del tema.

Para la aplicación de la entrevista se realizó previamente un guion de 9 preguntas que sirvió como guía para el entrevistador y se efectuó de forma individual a cada entrevistado.

A continuación, se presentan la transcripción de las dos entrevistas realizadas las cuales brindan un panorama más amplio de lo consultado en la encuesta.

7.2.1 Entrevista Ing. José Luis Regalado

Ingeniero Electricista, sobre su experiencia laboral fue Gerente de Electricidad en SIGET durante 16 años, actualmente es consultor de energías renovables y docente de la Universidad Don Bosco para la maestría de Gestión Energética y Diseño Ambiental.

Pregunta 1: ¿Cuáles son las garantías más comunes que ofrecen los fabricantes de los paneles fotovoltaicos de las plantas que usted administra?

La mayoría de los fabricantes ofrecen las mismas garantías que son prácticamente la curva de degradación y eso lo tienen en su catálogo. Además de los cambios ante fallas de fabricación en los módulos, por ejemplo, las cracks voice burbujas que pueda tener el panel o que surjan durante el desempeño. El período de garantía que ofrecen los fabricantes es de prácticamente de 5 años, en mi experiencia con JINKO SOLAR, GSL, CANADIAN, en los tres casos este ofrece el mismo tipo de garantía.

¿Es decir que los fabricantes vienen a monitorear el envejecimiento?

No. son parte de las tareas del O&M, se elaboran las curvas de corriente voltajes y si en algún momento se dispara respecto a lo que ofrece el fabricante entonces ahí se le hace saber al fabricante.

¿Cómo se lleva a cabo el monitoreo?

Se trata de cantidades enormes de módulos se hace un muestreo y dependiendo de los resultados así se focaliza, por decir algo en un punto determinado se encontró un módulo que presentó una curva diferente o que se presenta con dudas entonces se va monitoreando anualmente. Si luego de un segundo y tercer año se tiene que la curva es completamente diferente o sea des potenciado más de lo que se esperaba para el tiempo que tiene de estar en operación entonces se le notifica al fabricante. Es difícil que la fábrica en China se hagan cargo de las garantías, pero en el caso de reponer los módulos, se les notifica y hay un proceso que por cierto es largo.

Pregunta 2: ¿Cuál es el procedimiento para hacer válidas las garantías de los paneles fotovoltaicos?

Normalmente cuando se hace una compra de equipos esta se lleva a cabo mediante un contrato, es decir hablemos de un contrato de compra de n cantidad de módulos que van a ser instalados en “x” lugar, se especifica la ubicación y demás detalles donde se establecen las referencias del contacto de a quién se le va a dirigir la comunicación en caso de reclamos por garantía.

Pregunta 3: ¿Según su experiencia, las fallas en los módulos fotovoltaicos están relacionadas con el tiempo de operación de estos mismos?

no necesariamente, prácticamente las fallas están relacionadas a las condiciones geográficas propias del lugar por ejemplo la incidencia de rayos en el sitio. Esta será una de las causas más comunes de daños en módulos en el país es debido a las descargas atmosféricas. La segunda causa más común se debe a las construcciones defectuosas (no se refiere a los malos diseños de las plantas) sino a por ejemplo a la polarización a

tierra que al momento de recibir la planta funciono bien, pero con el tiempo falla esa polarización ocasionando que se dispare y eso no ayuda durante descargas atmosféricas. la tercera causa es referente al daño físico pues por impacto de piedras o similares.

¿Los daños en módulos causados por descargas atmosféricas se encuentran dentro de los alcances de la garantía o simplemente el fabricante no lo cubre?

El fabricante del módulo detalla las características mínimas de instalación. Los rayos se vuelven una condición natural es por eso que la descarga atmosférica no se reconoce como falla de fabricación del módulo obviamente se considera como un accidente (caso fortuito).

Pregunta 4: ¿Cuál es el volumen aproximado de paneles fotovoltaicos con fallas que tienen las plantas que usted administra? ¿Cuál es la principal falla?

Actualmente administro 5 parques. Donde hemos tenido una tasa mayor de fallos en módulos es en el sitio de Acajutla por las condiciones del lugar que esta ubicadas a 800 metros de distancia del mar, entonces esta condición de estar cerca del mar es muy propenso a atraer tormentas eléctricas entonces esta zona tiene bastante incidencia de rayos, si comparamos con los otros sitios en esta zona hemos tenido quizás cerca de él la falla de 500 módulos dañados por rayos en un periodo de tres años de operación de la planta de 44 megavatios instalados. En otra planta más antigua que tiene cerca de cinco años y medio, allí se han dañado únicamente dos módulos. Entonces uno puede ver la diferencia de la incidencia de las descargas atmosféricas en las zonas cercas a la costa. Es de mucha importancia investigar las condiciones del sitio sobre el drenaje de rayos para tratar de minimizar el impacto de estos. Para reducir esta problemática en nuestros parques se han implementado medidas para reducir la incidencia de fallas ocasionados por rayos reduciéndolo de forma drástica.

¿Que otro tipo de falla se ha identificado en las zonas que no están cerca de la costa?

Realmente también los rayos, pero en mucha menor escala, para darles un panorama en el país existe una ruta en la zona de la libertad entre la cordillera el bálsamo y el volcán de San Salvador y el cerro verde y en Santa Ana en estas zonas es realmente frecuente la incidencia de descargas atmosféricas por lo que se debería evaluar que tanto incrementaría la inversión al considerar el aterrizaje, pararrayos, etc.

En las nuevas plantas construidas con el estándar español y donde el sistema de puesta a tierra de los pararrayos no está conectada a la malla de puesta a tierra de la planta es decir esta flotante se está verificando si esta condición se mantiene para hacer correcciones ya que instalar los pararrayos de manera aislada permite diferencias de potencial al momento de impacto de un rayo. Unificar todo el sistema de puesta a tierra del campo fotovoltaico podría eliminar o reducir claramente los problemas de daños de módulos por impacto de rayos.

El inversor por fortuna está encapsulado en un contenedor metálico que tiene su propia red de tierra interconectada a la red de puesta a tierra existente. El contenedor funciona como una jaula de Faraday y esto ayuda a que todos los equipos electrónicos que están dentro estén protegidos. Hasta el momento no hemos tenido incidencias por descargas atmosféricas.

Con los módulos tenemos daño en los diodos de corriente inversa debido a descarga atmosférica y en este momento estamos coordinando con los fabricantes chinos que nos provean una cantidad baja de diodos para poder hacer la reparación de los módulos dañados. Ellos (los fabricantes) venden 5 mil piezas o más, pero nosotros no necesitamos. Este sería un primer paso que vamos a dar para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.

Pregunta 5: ¿Ha detectado actualmente el almacenaje de los desechos de paneles fotovoltaicos (con falla) representa algún problema ambiental para las plantas que administra? ¿Como están llevando a cabo el proceso de almacenamiento de paneles con falla?

Los módulos realmente ya están desmontados están en los patios de la planta lo que hacemos es cuantificados nada más, una vez obtengamos los diodos vamos a hacer las intervenciones para cambiarle los diodos a los módulos, esto se ha coordinado con el fabricante de módulos y ha explicado cómo hacer ese proceso.

Pregunta 6: ¿Ha tenido contacto o acercamiento con empresas que locales o internacionales que briden los servicios de reciclaje o disposición final de paneles fotovoltaicos?

Aquí en el país no hay entiendo yo. Creemos que, si existen opciones fuera del país específicamente en Europa, pero no hemos indagado sinceramente sobre estas empresas que hagan la disposición final de los módulos. Es muy probable que en los próximos cinco años se empiece a indagar sobre esas empresas como parte del protocolo de cierre del proyecto. Además, se presentó el permiso ambiental ahí se encuentra incluido el protocolo de cierre sobre la disposición final de los módulos, de los inversores y de los metales de tal forma que las plantas que están sobre piso, esos terrenos deben de quedar en la misma condición como cuando se no eran utilizados para las plantas fotovoltaicas. Esa es la perspectiva que se tiene para los últimos años de vida del proyecto, pero realmente eso puede ser no necesariamente hacer así, puede que el proyecto sigue existiendo cinco o diez años más y estén renovando los contratos.

En caso q de no renovar en los últimos cinco años finales del proyecto, se tendría que gestionar la disposición final, entonces en ese momento se espera que ella exista otras alternativas para los módulos que se dañan completamente que son catalogados como inservibles y que físicamente mantienen su forma rectangular se podría pensar en reutilizarlos como parte del techo artístico para las instalaciones de la misma planta. Esto no nos va a permitir reciclar todos los módulos porque es una cantidad considerable, pero

si parte de los módulos, darles un segundo uso no como el uso original ya que sabemos que no vamos a tener un reciclaje total de los módulos, pero se puede proyectar una disminución dándoles un segundo uso a los equipos.

En los últimos años de vida útil se va a tener que pensar más en detalle cómo mejorar los procesos de reciclaje porque el módulo está compuesto de vidrio y aluminio. Este vidrio de silicio y los derivados del silicio son vidrio y componentes metálicos que llevan los diodos y las partes plásticas. Entonces en su momento las empresas vayan a percibir ya que habrá tanta cantidad de módulos a reciclar que deberá existir una empresa que se dedique a hacer el separado de los materiales, principalmente el reciclado consiste en separar materiales para obtener parte del aluminio, si hay cobre que son unas placas en las líneas conectores que se ven en las celdas y luego el vidrio del silicio que es un elemento químico común. Tuve la oportunidad de visitar en Alemania una planta de reciclaje de desechos sólidos, prácticamente de basura en pocas palabras son plantas de separación de elementos orgánico, el vidrio, los metales y los plásticos, prácticamente se separan y luego pasan a molinos donde se terminan de triturar. Supongo que por ahí iría encaminado en estos procesos de reciclaje porque tanto el vidrio como los metales son cien por ciento reciclables.

Pregunta 7: ¿Cómo se está llevando a cabo la disposición final de residuos producto de fallas tempranas en paneles fotovoltaico en las plantas que usted administra?

Por cuestiones de espacios los tenemos así expuestos en el campo, estar de esta manera no está generando algún tipo de problema ambiental con la planta porque los que están operando están expuestos y están en la misma condición. El daño de módulos prácticamente por el diodo prácticamente si uno ve el módulo del panel este a no ser que se pruebe eléctricamente no puede diferenciarse un panel bueno o un panel que se encuentre dañado prácticamente solo al medir la cajita de diodos sabe uno que están abiertos, y básicamente es lo mismo nada más que no está conectados.

Pregunta 8: ¿Según su criterio cuál sería un incentivo (privado o gubernamental) para impulsar el tema del reciclaje y/o disposición final de paneles fotovoltaicos?

Aquí en el país hay dos tipos de incentivos: los legales y los incentivos económicos. Los incentivos legales puede ser una legislación ambiental que obligue a reciclar por decir algo nosotros votamos la basura todas juntas porque no tenemos la obligación legal de separarla, pero digamos en algunos lugares es obligatorio separar el plástico del vidrio y los metales del orgánico. El incentivo económico podría ser una retribución o una disminución de impuestos o algo parecido con la debida disposición de los de los módulos. Así como está la ley de incentivos fiscales para el fomento de la generación de energía renovable podría haber una ley de incentivos fiscales para el reciclaje de todos los elementos no solo de los módulos. En el cierre del proyecto no se consideró esa parte como no se le dio ni una obligatoriedad solo prácticamente al cierre del proyecto si lo considera que se deberá hacer una adecuada disposición final de los de los módulos.

Pregunta 9: Desde su percepción y teniendo en cuenta la cantidad de nuevas plantas fotovoltaicas que se están construyendo en El Salvador ¿La disposición final de paneles fotovoltaicos será en la próxima década un problema importante por resolver?

La disposición final de paneles fotovoltaicos será en la próxima en década un problema importante a resolver para las primeras plantas que iniciaron sus operaciones en el 2014

En proyectos de repotenciación se quitan los módulos, pero no se desechan, sino que se reutilizan para otros proyectos. Se sabe que van a rendir menos, pero de esa forma si analizan bien el precio se disminuye obviamente ya que están degradados solo si existiera una obligación legal o un incentivo económico muy fuerte de otra forma asumo que en los próximos diez años no hubiese necesidad del reciclaje de módulos

7.2.2 Entrevista Ing. Javier Medrano

Ingeniero electricista con especialidad en energías renovables de la Universidad Don Bosco. Maestro en dirección de empresas de la universidad Centroamericana José Simeón Cañas. Actualmente se desempeña como responsable de fotovoltaica en Grupo

TSK para gestión, la operación y mantenimiento en plantas solar fotovoltaicas de conexión a red de gran escala (240MW). Con cinco años de experiencia en construcción y puesta en marcha de parques solares y subestaciones de Alta tensión.

Pregunta 1: ¿Cuáles son las garantías más comunes que ofrecen los fabricantes de los paneles fotovoltaicos de las plantas que usted administra?

Ciertamente el tema de las garantías es algo bastante estándar con los fabricantes, la garantía básica que nosotros tenemos con los módulos es de un año por performance garantizado es decir 20 años de potencia. La hoja usualmente trae un valor de factor de degradación a nivel técnico de 20 años, pero va a tener este valor de degradación anual de potencia y por performance de 1 a 2 años, es decir el panel le va a rendir tal cual la hoja de datos 12 años.

Pregunta 2: ¿Cuál es el procedimiento para hacer válidas las garantías de los paneles fotovoltaicos?

los procesos son igual estándares en lo común de ambos es reportar el fallo al fabricante directamente. Ellos solicitan una serie de pruebas para validar los reclamos por garantía. El principal de ellos es la termografía infrarroja de los módulos: termografía frontal bajo ciertas normas. Hay fabricantes que brindan su procedimiento, pero todo parte de una termografía frontal no sólo a nivel termográfico si no que ellos envían un procedimiento de validación del reclamo a través de un estudio de curvas, estudio de rendimiento de los módulos y un registro fotográfico exhaustivo. El número de serie que uno tenga inventariado es muy importante además que el instalador haya cumplido el manual de instalación de los módulos que se haya instalado tal cual ellos según el contrato de aprovisionamiento.

Pregunta 3: ¿Según su experiencia, las fallas en los módulos fotovoltaicos están relacionadas con el tiempo de operación de estos mismos?

La falla más común en un bajo rendimiento del módulo solar se le llama falla por diodo de bypass. Los módulos se dividen en tres secciones y cada uno tiene un módulo que permite la generación. Esto también es garantizado por los fabricantes y así pasa en

menos de dos años aplica el reclamo siempre y cuando esté bien justificado y luego pues otra falla muy común tiende a ser las microfracturas que es un poco más difícil de determinar y depende mucho del proceso de instalación. Las microfracturas no causan una baja de rendimiento tan importante, pero si será un problema a largo plazo. Las instalaciones usualmente están garantizadas por más de 25 años dependiendo de los contratos, y lo que se busca en esta clase de estudio y esta clase de contrato es que el rendimiento esté garantizado y estas dos causas principales estén incluidas dentro de las garantías.

Fallas debidas por descargas atmosféricas es otra falla común, pero yo no la considero como una falla que entran en garantía porque es un agente externo por eso no las mencione, pero sí también es muy común.

Existen fallas que son perceptibles un tiempo después o casi inmediatamente que se ha conectado en el string lo que sucede internamente es que la pequeña cajita que trae el módulo la soldadura es manufacturada por un robot entonces cuando la falla se da en un componente electrónico es posible que se puede reparar de hecho el fabricante envía incluso un procedimiento para reparar. En este caso es mejor exigir la garantía ya que muchas veces en estas reparaciones hay un error humano asociada y posteriormente puede desencadenar otra falla imperceptible incluso ser causada también por agentes externos.

Un módulo puede poder presentar o aparentar una falla de bypass, pero puede ser porque tiene un área de su superficie con sombra constante entonces el fabricante valida también la instalación y el mantenimiento porque el tema de la suciedad también puede causar que se active y si esa es una condición sostenida en el tiempo daña el módulo.

Pregunta 4: ¿Cuál es el volumen aproximado de paneles fotovoltaicos con fallas que tienen las plantas que usted administra? ¿Cuál es la principal falla?

La principal falla en módulos es a causa de los impactos de rayos (descargas atmosféricas) ya sean directas o indirectas. A razón de esta situación toca reemplazar

los módulos además otra causa es también el daño a la propiedad ya sea por vandalismo (impacto de rocas) aunque con menos incidencia.

Sobre los porcentajes que se han registrado por fallas que han presentado en los paneles específicamente se puede decir que nueve de cada diez módulos que cambiamos es porque están dañados por descargas atmosféricas. En las plantas que operamos de 420.000 paneles resultan 300 unidades afectadas es decir menos del 0.1% y anualmente tampoco alcanza ni el 1%.

Pregunta 5: Cuando detectan un panel con falla debido a una descarga atmosférica, ¿Cuál es el proceso por seguir para reemplazar ese panel?

El proceso es bien simple esa clase de fallos si son perceptibles con el análisis del performance de los strings entonces como son acciones correctivas nuestros procedimientos indican cierta prueba que se deben hacer primero: el análisis de producción, la inspección visual de una termografía luego estudio eléctrico que incluye medición de parámetros y finalmente el reemplazo.

Pregunta 6: ¿Ha detectado actualmente el almacenaje de los desechos de paneles fotovoltaicos (con falla) representa algún problema ambiental para las plantas que administra?

Los paneles se encuentran apilados a la intemperie dentro de la misma planta (almacenamientos temporales). Considero que no representan un problema ambiental ya que han sido fabricados para operar en intemperie.

Pregunta 7: ¿Ha tenido contacto o acercamiento con empresas locales o internacionales que brinden los servicios de reciclaje o disposición final de paneles fotovoltaicos?

Locales no. Lo que se ha tenido es una reunión hace tres meses, pero era una empresa de logística más no una empresa que localmente lo gestione. A manera internacional hace tres años entré en contacto con una empresa que se encarga del reciclaje.

Pregunta 8: ¿Cómo se está llevando a cabo la disposición final de residuos producto de fallas tempranas en paneles fotovoltaicos en las plantas que usted administra?

Como operadores y no propietarios de la planta, nuestro alcance se limita a acompañar en las gestiones. Por ahora se reporta al proveedor y él debe encargarse de llevarse los módulos que resultan ser dañados.

El propietario al momento de comprar los módulos en la cláusula de aprovisionamiento se encuentra la disposición final de los paneles. La desventaja hoy en día es el costo por el servicio de disposición final es superado por mucho sobre el costo de logística de envío de los paneles hasta el lugar de destino, aquí es importante valorar el volumen de paneles para reducir costos.

Pregunta 9: ¿Según su criterio cuál sería un incentivo (privado o gubernamental) para impulsar el tema del reciclaje y/o disposición final de paneles fotovoltaicos?

A nivel gubernamental se me ocurren varias propuestas por ejemplo en procesos de licitación incluir en los contratos que cada cierto tiempo (cinco años) se deba registrar el proceso de disposición a los módulos verificando que se haya desechado de forma correcta y garantizarlo con algún incentivo como la exoneración de algunos aranceles. Además, el gobierno a través de sus ministerios podría promover leyes de conservación de medio ambiente con respecto a los proyectos fotovoltaicos con la aplicación de multas y que sea incluido dentro de los permisos previos a la ejecución.

Del lado empresarial privado podría ser la motivación por el reconocimiento internacional y el prestigio y la proyección que aportan a la empresa sobre la gestión ambiental y la responsabilidad social empresarial.

Pregunta 10: Desde su percepción y teniendo en cuenta la cantidad de nuevas plantas fotovoltaicas que se están construyendo en El Salvador ¿La disposición final de paneles fotovoltaicos será en la próxima década un problema importante por resolver?

Si, en mi opinión esto si será un problema si no se busca que hacer sobre todo en nuestra región ya que no somos fabricantes no somos recicladores de esta tecnología simplemente somos implementadores y usuarios de la tecnología solar, desde el 2014 El Salvador ha optado por apostar por esta clase de tecnologías es muy importante buscar soluciones o alternativas para reutilizarlos como, por ejemplo, mesas o fascias en edificios.

Pregunta 11: ¿El ministerio de medio ambiente brinda algún tipo de seguimiento anual o cada cierto tiempo sobre la gestión ambiental en general de cómo llevan la gestión de residuos?

Si, el propietario y el operador lleva ese seguimiento en conjunto, se realiza de forma anual. Para la implementación del proyecto el MARN exigió compensar con árboles en la construcción del parque y literalmente llega a contar los árboles y si siguen estando los árboles ahí y su crecimiento congruente con la literatura.

Pregunta 12: ¿Qué clase de herramientas utilizan para mantenimiento preventivo de los paneles?

Actualmente se utilizan drone para el análisis termográfico, estas tecnologías son mucho más rápidas ahorrando mucho tiempo, sin embargo, también seguimos realizando las mediciones en sitio para ir corroborando la información que brindan los drones.

CAPÍTULO 8 ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO

8.1 Generalidades.

En este capítulo se desarrollará una guía con criterios técnicos y financieros que servirán para la toma de decisiones que tengan que ver con el reciclaje o disposición final de módulos fotovoltaicos.

Como ya se mencionó en el capítulo 4 en los Programas de Manejo Ambiental (PMA) vistos en la sección 4.4.1., algunos generadores plantearon que efectivamente iban a dar tratamiento a los residuos de paneles fotovoltaicos, pero no la metodología a utilizar.

Así también, se evidenció a través de la revisión de la regulación/leyes del país que no existen leyes específicas para los residuos de módulos fotovoltaicos.

Por lo anterior, se vuelve importante mencionar cuáles serán los lineamientos más importantes para considerar para iniciar un proceso de disposición final o reciclaje.

8.2 Empresas de reciclaje local.

Empresas de reciclaje y acopio en El Salvador enfocadas la gestión de residuos de módulos fotovoltaicos no se encuentra una establecida en el país, pero si existen empresas que gestionen residuos similares como lo son los electrónicos.

Según el directorio de empresas locales recicladoras y recuperadores autorizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, las siguientes empresas brindan servicios de gestión de residuos similares a los generados por los módulos fotovoltaicos.

Tabla 21 Directorio de empresas locales recicladoras y recuperadoras autorizadas por el MARN.

No	Empresa	Tipo de actividad	Tipo de desecho	Contacto	Dirección	Teléfono	Email
1	Almacenamiento Todo Verde: proveen servicio de almacenamiento de paneles fotovoltaicos y se encuentran en trámites para obtener el permiso de exportación de materiales para dar disposición final.	Acopiadora	Todo tipo, incluyendo equipos electrónicos, baterías ácido plomo, mercurio, computadoras, accesorios, desechos eléctricos con materiales pesados	Vladimir Ernesto Flamenco Córdova	San Antonio Achichilquito, San Vicente	21012275; 79283729	vladiflamenco@yahoo.es
2	CORINCA	Recicladora	Acero, aluminio e importación de sustancias peligrosas	Jesús Antonio Canizales	Carretera a San Juan Opico, entrada a Quezaltepeque	2310- 2202/ 2310- 2491	-
3	E scraps	Acopiadora	Desechos electrónicos	Vladimir Meléndez	-	7410-9790/ 7613-8816	escraps@yahoo.com

Fuente: Directorio de empresas autorizadas por el MARN.

Se contactó a las empresas antes mencionadas para conocer más sobre sus servicios y estos se relacionan directamente con los módulos fotovoltaicos y se obtuvo la siguiente información:

- **Almacenamiento Todo Verde:** brindan el servicio de almacenamiento de paneles fotovoltaicos y se encuentran en trámites para obtener el permiso de exportación de este tipo de materiales y así dar disposición final. El precio para el almacenaje de los residuos varía según el peso (kilogramos).

8.3 Ejemplo de metodología de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

Se identificó una empresa local que brinda los servicios de logística para la gestión de residuos. Esta empresa está asociada a una empresa extranjera para dar disposición final o reacondicionamiento de los paneles en el extranjero (Estados Unidos).

La estructura de logística entre ambas empresas es la siguiente:

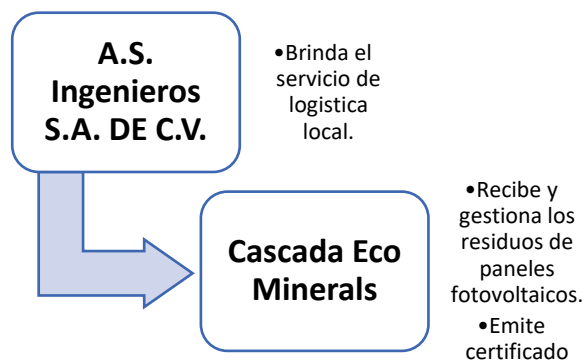


Figura 48 Estructura de gestión de residuos de paneles fotovoltaicos.

Fuente: Propia.

8.3.1 Cascada Eco Minerals.

El socio estratégico de A.S. Ingenieros es Cascada Eco Minerals, empresa situada en Texas, Estados Unidos. Esta ofrece dos servicios:

- Reciclaje de paneles fotovoltaicos.
- Renovación de paneles fotovoltaicos.

A continuación, se detalla más información sobre ambos servicios.

8.3.1.1 Servicio de reciclaje de paneles fotovoltaicos.

El reciclaje de paneles solares fotovoltaicos es un proceso especializado porque las unidades se ensamblan a partir de diversos materiales. Entre ellos:

- Aluminio (marco)
- Vidrio (cubierta frontal de la mayoría de los paneles fotovoltaicos)
- Materiales sintéticos utilizados para encapsular y sellar las células de silicio.
- Metales: plomo, cobre, galio e indio.

El procesamiento adecuado de los paneles solares requiere que estos materiales se separen y recuperen con el mínimo daño y pérdida de material.

Los materiales se pueden reutilizar para fabricar nuevos paneles o para otras aplicaciones industriales con el fin de reforzar la economía circular.

8.3.1.2 Servicio de renovación de paneles solares fotovoltaicos.

La empresa se ha aliado estratégicamente con la mejor empresa de renovación de paneles fotovoltaicos del país para ofrecer una solución completa de procesamiento solar. Proporcionan a los fabricantes, a sus distribuidores, a los comerciantes y a los instaladores, programas seguros para garantizar que todos los paneles de grado "C" de los fabricantes, con garantía de fábrica, desinstalados o dañados de cualquier otra forma, se someten a pruebas para su reacondicionamiento o se vuelven a procesar completamente para convertirlos en materias primas para su fabricación y volver a introducirlos en los mercados mundiales.

8.3.2 Alcances del servicio de A.S. Ingenieros.

La empresa A.S. Ingenieros brinda el servicio de logística local y dentro de su servicio se tienen los siguientes alcances:

- Armado de paquetes.
- Carga de módulos en contenedores.
- Transporte de módulos hacia planta de reciclaje en Texas, Estados Unidos.

- Tramites portuarios y aduanales de exportación de los módulos.
- Procesamiento de paneles solares en la planta de reciclaje.
- Certificado de destrucción y reciclado de los módulos solares, avalados por las leyes estatales y federales de Estados Unidos.

8.3.3 Certificado de destrucción y reciclaje.

La empresa Cascada Eco Minerals (CEM) luego dar tratamiento a los paneles fotovoltaicos fuera de uso por daño emite un certificado de reciclaje y destrucción similar al siguiente:

Certificate of Destruction & Recycling

This document certifies that the material described below was received, processed, and beneficially recovered by Cascade Eco Minerals.

<p>Sample Company 777 Main Street Medford, OR 97501</p>	<p>Reference Number - Shipment 123</p>
---	--

Material Type	Units	Gross Weight (lbs.)	Net Weight (lbs.)
Solar Scrap	13 pallets	18,028	16,668

I certify that the Materials referenced above were destroyed & recycled according to established procedures in compliance with all applicable local, state, and federal regulations.

<p><i>Curt Spivey</i></p> <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> <p>Authorized Signature</p>		<p>1/3/2020</p> <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> <p>Date</p>
---	---	---

This document is proprietary and confidential. No part of this document may be disclosed in any manner to a third party without written consent of Cascade Eco Minerals.

Cascade Eco Minerals · Medford Oregon · (541) 516-1100

Figura 49 Certificado de destrucción y reciclaje de paneles fotovoltaicos emitido por Cascade Eco Minerals.

Fuente: Cascade Eco Minerals

8.3.4 Tarifas.

El detalle de costos del servicio consultado a A.S. Ingenieros es el siguiente:

Tabla 22 Precio por servicio de reciclaje de paneles

Detalle	Precio (USD)
Reciclaje por panel fotovoltaico: transporte se hará en contenedores de 40 pies, cada contenedor será cargado con 12 paquetes de módulos solares. Cada paquete será de 60 paneles solares. Por lo que estaremos transportando 720 paneles solares en cada contenedor.	$\$47.00 + \text{IVA} / \$50.00 + \text{IVA}$

Fuente: A.S. Ingenieros S.A. de C.V.

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- 1.** El Salvador actualmente no posee regulación sobre la disposición final de módulos fotovoltaicos. Tampoco cuenta con iniciativas que promuevan el reciclaje a corto plazo.
- 2.** En El Salvador no existe compañías que se encarguen de dar disposición final a los módulos fotovoltaicos. Únicamente existen compañías que se encargan de la logística de traslado de los módulos fotovoltaicos hacia empresas en el extranjero especializadas en reciclaje y reutilización.
- 3.** Los procedimientos para hacer efectivas las garantías de módulos fotovoltaicos con fallas varían según el fabricante. El trámite incluye reporte fotográfico exhaustivo, test de termografía infrarroja y mediciones eléctricas.
- 4.** La falla que se presenta con mayor frecuencia es la de impacto de rocas y similares debido al vandalismo así mismo los impactos a causa de las descargas atmosféricas especialmente para las plantas fotovoltaicas que se encuentra ubicadas cerca de la costa. Estas fallas por considerados casos fortuitos no aplican en las garantías de los fabricantes de módulos fotovoltaicos.
- 5.** La gran mayoría de empresas que se sometieron al análisis confirman que no poseen un proceso para la disposición final de módulos fotovoltaicos. Los paneles que se identifican con falla son almacenados dentro de las plantas generalmente en espacios abiertos, apilados y expuestos sin que representen algún riesgo para el medio ambiente.
- 6.** Sobre la promoción del reciclaje y la disposición final de módulos fotovoltaicos, el mayor incentivo que puede ofrecer a nivel gubernamental es la exoneración de aranceles en la adquisición de insumos para la ejecución de plantas fotovoltaicas y los impuestos.
- 7.** Para la próxima década el tratamiento y disposición final de paneles fotovoltaicos representara un grave problema para el país. Ya que no somos fabricantes ni recicladores únicamente somos usuarios de la tecnología. Desde el 2014 el país ya cuenta con una

capacidad instalada considerable y será necesario que se creen las condiciones legales para que las empresas deban dar el tratamiento adecuado a los desechos promoviendo la conservación del medio ambiente. Además de promover el reciclaje.

8. Las plantas fotovoltaicas consultadas se encuentran en su gran mayoría ubicadas en el oriente del país cerca de la costa. Esta condición las vuelve vulnerables a sufrir de fallas en los módulos fotovoltaicos a causa de los impactos de descargas atmosféricas, se ha demostrado que una adecuada aplicación de un sistema de aterrizaje de descargas atmosféricas puede reducir considerablemente estos impactos.

RECOMENDACIONES.

1. Mientras se establezcan las regulaciones para el manejo de desechos de módulos fotovoltaicos por el MARN, se deben generar las alternativas para la reutilización de los paneles con fallas gracias a que están hechos principalmente de vidrio y aluminio; cuyos elementos son fácilmente reutilizables, y no son peligrosos para la salud, como aplicación de nuevas alternativas de uso prácticas y de bajo impacto económico, como por ejemplo aplicaciones en la construcción de cubiertas, divisiones livianas, fascias y en fachadas.

2. El tener una regulación exclusiva para la gestión de residuos de paneles fotovoltaicos ayudaría en gran medida a establecer lineamientos claros para los generadores de energía, además, teniendo una vigilancia constante de las autoridades se asegura el cumplimiento de ley. Existen ejemplos exitosos de regulaciones en otros países que pueden servir de base y adaptar las mismas medidas a la realidad salvadoreña.

3. Es necesario que los propietarios de las plantas de generación solar fotovoltaicas construyan su manual de procesos para el tratamiento de disposición final de paneles que garantice la preservación del medio ambiente mientras el país prepara las herramientas legales para brindar una adecuada disposición de estos desechos.

Bibliografía

- Auto Solar. (9 de 8 de 2018). *La curva de intensidad-voltaje y la de potencia-voltaje de un panel solar. El papel del regulador de carga*. Obtenido de <https://autosolar.es>
- Balenzategui, J. (2006). *Tecnología de Células de Si Cristalino*. Madrid, España: EOI Escuela de Negocios.
- Campos, A., Choto, E., & Perdomo, N. (2020). *Estudio sobre los residuos provenientes de instalaciones solares fotovoltaicas y su manejo en El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Repositorio Institucional – Universidad Don Bosco.
- Chaparro, J. (2019). *Manejo integral de los residuos generados por los paneles solares fotovoltaicos en Colombia*. Bogotá: UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- CNE. (2018). *Plan Indicativo de la Expansión de la Generación Eléctrica de El Salvador 2019-2028*. San Salvador, El Salvador.
- D. (2009). *"Article on PV Cycle, Making photovoltaics "DoubleGreen"*.
- Díaz, T., & Carmona, G. (2018). *LA - Instalaciones solares fotovoltaicas*. McGraw-Hill.
- First Solar . (2011). *Panel collection and recycling programme*. Obtenido de http://www.firstsolar.com/en/recycle_program.php
- First Solar . (2017). *First Solar Sustainability Report*.
- IRENA & IEA-PVPS. (2016). *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. Alemania: International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

- Larsen, K. (2009). End of life PV: then what? Recycling solar PV panels. *Renewable energy focus*.
- Larsen, K. (2009). End of life PV: then what? Recycling solar PV panels. *Renewable energy focus*.
- Lincot, D. (2009). Summary report on Environmental, Health, and Safety (EHS) aspects of First Solar cadmium telluride(CdTe) photovoltaic(pv) systems by the French Ministry of Ecology . *Energy, Sustainable Development*.
- MARN. (2007). Reformas al Reglamento de Ley de Medio Ambiente. San Salvador, El Salvador.
- MARN. (2012). Acuerdo No. 33. *Modificación al Acuerdo Ejecutivo No. 39, de fecha 26 de abril de 2007, que contiene la Categorización de Actividades, Obras y Proyectos, según manda la Ley de Medio Ambiente*. . San Salvador, El Salvador: Diario Oficial.
- MARN. (2017). Guía técnica para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de El Salvador. El Salvador.
- McKinney, S., & Yonavjak. (2013). *Mineral resources, environmental science systems and solutions*. Jones & Bartlett Learning.
- Miguel, A. A. (2001). Sistemas fotovoltaicos . *Introducción al diseño y dimensionamiento*. SAPT de Publicaciones técnicas.
- Navnotf, C., Biurrún, N., Paz, M., Cuccorese, S., Ramos, I., & Raggio, D. (2019). Manual de generación distribuida solar fotovoltaica. Argentina: Secretaría de Gobierno de Energía.
- Novoa, E. G. (2015). Manual de Operación y Mantenimiento Preventivo y Correctivo para parques Fotovoltaicos en el Ecuador. . Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Ökopol. (2007). *Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products*.

- Ökopol. (2007). *Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products.*
- Parvez, M., Candace, L., Nazmut, H., & Shahjadi, H. (5 de Septiembre de 2018). Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. *Energies*.
- PV Cycle . (2016). *PV Cycle annual report 2016 - 'Operational and Financial Review'*.
- Ramírez, A. (2018). Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia. . Colombia: Universidad EIA.
- Renova Energía. (2013). *Sistemas Solares Fotovoltaicos Conectados o de Conexión a Red Pública*. Obtenido de <https://www.renova-energia.com/energia-renovable/energia-solar-fotovoltaica-conexion-de-red/>
- Renova energía. (2021). *Sistemas Solares Fotovoltaicos Conectados o de Conexión a Red Pública*. Obtenido de <https://www.renova-energia.com>
- Sierra, M., Vásquez, C., & Ramírez-Piscoc, R. (2020). Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 74-90. doi:<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.36089.60004/1>
- Statista. (Marzo de 2022). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com>