

UNIVERSIDAD DON BOSCO



**ESTUDIO SOBRE LOS RESIDUOS PROVENIENTES DE
INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS Y SU
MANEJO EN EL SALVADOR**

TRABAJO PREPARADO PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍAS UDB

PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAESTRO EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTADO POR:
**ALVARO JOSUE CAMPOS RAMOS
EDUARDO ENRIQUE CHOTO AGUIRRE
NELSON ALEXANDER PERDOMO CALDERÓN**

ASESOR:
ISMAEL ANTONIO SÁNCHEZ

ANTIGUO CUSCATLAN, EL SALVADOR, C.A.
AGOSTO 2020

1. CONTENIDO

Resumen.....	8
Capítulo 1 Introducción.....	10
1.1. Generalidades	10
1.2. Objetivos	10
1.2.1. General	10
1.2.2. Específicos.....	11
1.3. Límites y Alcances	11
1.3.1. Límites	11
1.3.2. Alcances	11
1.4. Metodología	11
Capítulo 2 Marco Teórico.	13
2.1. Sistemas Fotovoltaicos	13
2.2. Tipos de Instalaciones.....	14
2.2.1. Instalaciones Aisladas de la Red.....	14
2.2.2. Instalaciones conectadas a la red	14
2.2.3. Instalaciones Híbridas	14
2.3. Elementos de los Sistemas Fotovoltaicos	14
2.3.1. Módulo solar (panel solar) fotovoltaico	14
2.3.2. Inversor	22
2.3.3. Acumulador de carga (Batería).....	22
2.3.4. Regulador de Carga.....	22
2.3.5. Elementos de protección	22
2.4. BOS Instalación.....	22
2.4.1. Montaje	23
2.4.2. Componentes Mecánicos.....	26
2.4.3. Componentes Eléctricos	28
Capítulo 3 Análisis del Ciclo de Vida del Sistema Fotovoltaico.....	30
3.1. Ciclo de Vida.....	30
3.2. Indicadores LCA	32
3.2.1. Demanda de Energía Primaria	32
3.2.2. Tiempo de Retorno de la Inversión de la Energía.....	32
3.2.3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	33

3.3.	Análisis BOS	33
3.4.	Inventarios Ciclo de Vida	35
Capítulo 4 Fallas en Sistemas Fotovoltaicos		37
4.1.	Definición de falla de modulo fotovoltaico.....	37
4.2.	Problemas que no Generan Falla Terminal en los Módulos.....	38
4.3.	Fallas Físicas Debido a Condiciones Externas	38
4.3.1.	Anclaje y soporte de módulos.....	39
4.3.2.	Transporte e instalación.	39
4.3.3.	Fallas en los conectores rápidos.....	40
4.3.4.	Rayos.....	40
4.3.5.	Vandalismo.....	41
4.4.	Fallas Generales de Paneles Solares	41
4.4.1.	Separación de láminas.....	41
4.4.2.	Pérdida de adherencia en la capa posterior.....	42
4.4.3.	Fallo en la caja de unión.....	43
4.4.4.	Grietas en las células.....	43
4.4.5.	Marcas de quemaduras.....	43
Capítulo 5 Proyección de Residuos Provenientes de Paneles Solares.		45
5.1.	Proyección Global	45
5.1.1.	Proyección de residuos de paneles solares.	46
5.1.2.	Paso 1 a: Estimación de los volúmenes de desperdicio de paneles solares	47
5.1.3.	Paso 1 b: Estimación de la probabilidad de pérdida de un panel solar en las diferentes etapas de su ciclo de vida	48
5.1.4.	Escenarios de estimación para los desperdicios producidos por los paneles solares. 49	
5.1.5.	Proyección mundial de residuos de paneles solares	51
5.1.6.	Proyección de residuos por País.	52
5.2.	Proyección Regional	54
5.2.1.	Capacidad Instalada Actual	54
5.2.2.	Proyección Final de Residuos en El Salvador	60
Capítulo 6 Normativa.....		66
6.1.	Internacional.....	66
6.1.1.	Convenio de Basilea y WEEE Directive	66
6.1.2.	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	67

6.1.3.	Opciones para la Gestión de Residuos	68
	Involucrados o <i>Stakeholders</i>	68
	Esquemas de financiamiento	69
6.2.	Nacional	71
6.2.1.	EsIA y Permiso Ambiental para la Ejecución de Proyectos Fotovoltaicos.	71
6.2.2.	Etapas para la Gestión de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). 73	
6.2.3.	Propuesta de Mejora.....	74
Capítulo 7	Conclusiones y Recomendaciones	75
7.1.	Conclusiones	75
7.2.	Recomendaciones	76
Referencias	77
Anexo 1	Masa Desechada Año Con Año Escenario de Falla Regular (Toneladas).....	79
Anexo 2	Masa Desechada Año Con Año Escenario de Falla Temprana (Toneladas)	81

2. ÍNDICE DE IMAGEN

Imagen 1 Tipos de Celdas de Silicio ((Ecofener, 2019))	15
Imagen 2 Celda de Teluro Cadmio (Empa, 2011)	16
Imagen 3 Celda de Arseniuro de Galio (NanoFlex´s Solar Technology, 2020)	17
Imagen 4 Celda CIGS (EcoInventos Green Technology, 2018)	17
Imagen 5 Celdas Bifaciales sin Marco (Alcubierre, 2009)	18
Imagen 6 Celdas de Concentración Parabólicas (Sitio Solar, 2013)	18
Imagen 7 Celda Solar de Graetzel (Romande Energie / Mediacom, 2013)	19
Imagen 8 Celda PERC (Schmid Expect Solutions, 2020)	19
Imagen 9 Celda de Perovskita (Sánchez Serradilla, 2014)	20
Imagen 10 Célula Orgánica (Izquierdo Morelos, 2016)	20
Imagen 11. Partes del Panel Solar Fotovoltaico (EcoInventos Green Technology, 2019) ..	21
Imagen 12. Instalaciones de Antares (Hernández, 2016).....	23
Imagen 13. Instalaciones en postes (Chaaban, 2018)	23
Imagen 14. Instalaciones de Paneles en Techos (Chaaban, 2018)	24
Imagen 15. Instalaciones Alineadas al Techo (Grupo Miguel)	25
Imagen 16. Ejemplo de ganchos para teja (Chaaban, 2018)	26
Imagen 17. Ejemplo de Ancla Tipo "L" (Chaaban, 2018)	27
Imagen 18. Ejemplo de Ancla S-5 (Chaaban, 2018)	27
Imagen 19. Flujo de las Etapas del Ciclo de Vida de Sistemas Fotovoltaicos (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015).....	31
Imagen 20. Manchas Café en los Bordes del Panel. (Köntges, y otros, 2014)	38
Imagen 21. Paneles con Vidrio Roto por Anclaje. (Köntges, y otros, 2014)	39
Imagen 22. Imagen 12: Ejemplo de Paneles Golpeados por un Rayo (Köntges, y otros, 2014)	41
Imagen 23. Separación de Láminas (Köntges, y otros, 2014).....	42
Imagen 24. Proyección Acumulada de la Capacidad Global de PV (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)	45
Imagen 25. Ajuste de la Curva Exponencial de la Proyección de la Relación Peso-Potencia del Panel Fotovoltaico. (IRENA; IEA-PVPS, 2016).....	47
Imagen 26. Tasas de Falla Según Quejas de Clientes. (IRENA; IEA-PVPS, 2016).....	48
Imagen 27. Ejemplo de Curva de Weibull con dos Factores de Forma Diferentes. (IRENA; IEA-PVPS, 2016).....	50
Imagen 28. Volumen Estimado de la Cantidad de Residuos PV Acumulado (IRENA; IEA-PVPS, 2016)	52
Imagen 29. Matriz Energética de El Salvador (CNE, 2019)	54
Imagen 30. Matriz Energética Según SIGET a Marzo de 2019 (SIGET, 2019)	55
Imagen 31. Mercado eléctrico minorista según tecnología (2018) (SIGET, 2018).....	56
Imagen 32. Participación de las Diferentes Fuentes de Energía Según Periodo 2005-2018 (CNE, 2018)	57

Imagen 33. Incremento de la demanda según CNE. (CNE, 2018)	58
Imagen 34. Demanda en Máxima de Potencia según SIGET. (SIGET, 2019)	59
Imagen 35. Resultados del estudio realizado por la USAID (Tetra Tech ES, 2015).....	60
Imagen 36. Proyección de Potencia demandada hasta 2050 (Elaboración Propia)	61
Imagen 37. Evolución de la Potencia Instalada en Solar Fotovoltaica (Elaboración Propia)	62
Imagen 38. Crecimiento de Capacidad Instalada y Masa Desechada de Páneles Solares (Elaboración Propia)	63
Imagen 39. Estructura de la Categorización (MARN, 2017)	71

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de Módulos Según su Tecnología.....	20
Tabla 2. Características de los Diferentes Tipos de Instalaciones	25
Tabla 3. Cantidades de Masas de Materiales por Componentes de un PV (Fthenakis & Kim, 2010)	34
Tabla 4. Balance del sistema (BOS) para Montajes en y sobre Techo (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015).....	35
Tabla 5. Materiales y Energías de Entrada para Producir 1 m ² de Módulo Incluyendo las Pérdidas en el Proceso. (Fthenakis & Kim, 2010).....	35
Tabla 6 Escenarios de Falla Alrededor del Mundo. Datos en Toneladas de Residuos (IRENA; IEA-PVPS, 2016).....	53
Tabla 7. Información Oficial Proporcionada por Ministerio de Hacienda.....	65

RESUMEN

Las instalaciones fotovoltaicas se conforman de uno o más paneles solares, cajas de unión, diodos protectores, un inversor, encargado de transformar la señal de corriente directa a señal alterna; estructura mecánica, sobre la cual se monta el panel y cable eléctrico, además tenemos instalaciones aisladas de la red las cuales poseen todos los componentes antes mencionados y añaden las baterías y reguladores al arreglo. Una vez la instalación alcanza su vida útil, ya sea residencial o a gran escala, plantea un nuevo desafío, lidiar con los residuos electrónicos y elementos básicos asociados a estos últimos. Entre los materiales residuales se encuentran el vidrio, cobre, silicio, plástico y metales pesados como el plomo que pueden llegar a contaminar el suelo y penetrar hasta mantos acuíferos. Actualmente a nivel regional se cuenta con el documento “Lineamientos para la gestión de los residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en Latinoamérica (RAEE)” y además El Salvador forma parte del convenio de Basilea, sin embargo, entidades como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) sugieren que a medida se incrementa la generación por energía solar fotovoltaica se hace necesario tener una legislación específica para el manejo de los residuos provenientes de este tipo de instalaciones. Es por ello que uno de los objetivos principales del presente estudio es cuantificar las cantidades de residuos, provenientes de instalaciones fotovoltaicas, que el país puede llegar a generar en el futuro, tomando como base al incremento de la demanda de energía eléctrica. Los resultados aquí presentados pretenden generar conciencia de la futura problemática que podría tener el país entre manos. La otra parte importante del documento consiste en la síntesis de las experiencias y medidas aplicadas en otros países, así como un breve repaso de las diferentes guías y lineamientos adoptados actualmente por El Salvador.

El capítulo uno pone en contexto y da justificación a la investigación realizada, así como denota la orientación general del trabajo, que en pocas palabras consiste en generar conciencia acerca de la temática y permitir que el lector sea capaz de identificar posibles soluciones al incremento de residuos que se sufrirá en el futuro.

El capítulo dos es una descripción general de los diferentes tipos de instalaciones fotovoltaicas, así como una descripción de las partes implicadas en dicho sistema y sirve como una puesta al día de las diferentes tecnologías de células solares que hay en la actualidad y cabe hacer la aclaración que el trabajo principalmente se enfoca en las células de silicio monocristalinas y policristalinas. Una parte importante del capítulo 2 es la introducción del balance del sistema o BOS (por sus siglas en inglés Balance of System), el cual consiste en el dimensionamiento de las diferentes partes de una instalación sin considerar el panel y su armazón, este mismo concepto conlleva el análisis de los diferentes tipos de montajes que pueden existir y las sutilezas que cambian el resultado final de volumen de componentes.

El capítulo 3 estudia el Análisis del Ciclo de Vida o LCA con el objetivo de recabar información útil sobre los volúmenes de material que se manejan en algunos ejemplos de instalaciones solares fotovoltaicas, así como para comprender el impacto ambiental que ocasiona la producción y uso de paneles solares como fuente de energía. Esta parte se enfoca en algunas de las métricas y brinda ciertos ejemplos encontrados en la literatura entre los cuales se destaca los balances de sistema y los inventarios de ciclo de vida que se encargan de hacer un dimensionamiento de los materiales que eventualmente se convertirán en residuos, arrojando ideas de que la cantidad se pueden generar en el futuro. Parte de las ideas vertidas en este capítulo tendrán cierta influencia en el análisis que se realiza en el capítulo 5

El capítulo 4 es una evaluación general de los diferentes modos de fallas que suelen o pueden llegar a ocurrir en los paneles solares y que brinda información útil puesto que establece que no necesariamente tienen que pasar 30 años para que una instalación fotovoltaica comience a producir residuos, la información brindada se basa en lo planteado por la Agencia Internacional de Energía. Este capítulo sirve como complemento al estudio de la Agencia Internacional de Energía Renovable o IRENA (por sus siglas en inglés), que es la base para la proyección ejecutada en el capítulo 5.

El capítulo 5 contextualiza el crecimiento esperado a nivel global en los próximos 30 años según la metodología aplicada por el IRENA y que a su vez sirve como base para plantear la proyección en El Salvador dentro del mismo margen de tiempo. La sección también muestra la investigación realizada para justificar los diferentes supuestos, necesarios para alimentar el modelo y así obtener un estimado aproximado de la cantidad de residuos provenientes de paneles solares, los datos en los cuales se fundamenta están basados en la información que diferentes entidades gubernamentales han puesto a disposición a través de sus sitios web y las investigaciones realizadas por estos mismos.

El capítulo 6 se centra en investigar cómo se aborda la temática en países con una expansión más prominente de la energía fotovoltaica y cómo se ha manejado la situación de los residuos provenientes de esta. Se describe también cuales son las bases actuales dentro del país y en base a esto hacer propuestas de mejora.

El cierre del documento se enfoca principalmente en concluir y generar una serie de recomendaciones que permitan manejar mejor la situación futura del país.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica solar en el país sigue siendo una fuente relativamente novedosa y cuya aplicación todavía no es tan amplia como en naciones vecinas, ejemplo Costa Rica, aun así, se prevé un uso más extendido de paneles solares en el futuro, tal como lo vaticinan las nuevas leyes de consumidor final con la cual este podrá instalar paneles residenciales e inyectar energía a la red. Es por ello que es necesario comenzar a tener una visión más amplia y pensar en los efectos secundarios de este incremento de paneles solares genera al medio ambiente, tema que resulta bastante esquivo cuando hablamos de una energía que tiene cero emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Los paneles solares tienen una vida promedio entre 20 a 30 años tiempo después del cual la eficiencia y capacidad para transformar energía se ve mermada lo cual puede motivar que sean desechados, sin ir tan adelante en el futuro las plantas solares actuales deben reponer paneles que se dañan por las condiciones ambientales y externas lo cual lleva a formular una pregunta muy válida ¿A dónde van todos esos residuos?, ¿Existe algún plan para gestionar que lugar se utilizara para el descarte de todos los paneles inservibles?, ¿Cuánto residuo puede llegar a producir el país en el futuro? Actualmente el uso de paneles solares como fuente alterna de energía está cobrando fuerza tanto en inversionistas, propietarios de edificios y cierto sector de la sociedad que puede permitirse la instalación de estos en sus casas, sumado al efecto que tendrán las leyes recientes y las que podrían crearse en el futuro, es importante comenzar a pensar en una regulación para el manejo de residuos y buscar referencias de como manejan otros países el incremento de residuos proveniente de las instalaciones con paneles solares, fenómeno que de no ser estudiado podría crear una crisis ambiental por sí solo.

1.1. GENERALIDADES

En esta tesis se realiza una investigación en cuanto a la disposición final de los residuos provenientes de sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica, así como una estimación de los volúmenes a ser producidos dado el incremento de la implementación de este tipo de sistema a nivel nacional.

Es importante destacar que existen diversas formas de afrontar el manejo de los componentes en desuso de los sistemas fotovoltaicos, por lo que es necesario investigar también las soluciones que otros países, con una mayor generación de energía fotovoltaica, han implementado para controlar el incremento de residuos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GENERAL

- Realizar un estudio que sirva para conocer los diferentes residuos provenientes de una instalación de paneles solares, a gran escala o escala residencial y generar conciencia del problema a futuro que supone manejar los desperdicios que provienen de estas.

1.2.2. ESPECÍFICOS

- Describir el ciclo de vida de los paneles solares.
- Dar a conocer los problemas al medio ambiente que pueden generar los diferentes elementos que componen un panel solar fuera de uso.
- Investigar qué medidas se toman en otros países para manejar los desperdicios de paneles solares.
- Investigar qué hacen las plantas solares más grandes del país para manejar los residuos que sus instalaciones producen desde el marco legal.
- Estimación del incremento de paneles en el país y el incremento de desperdicios.
- Realizar estimaciones basadas en hipótesis fundamentadas con información pública.
- Dimensionar que tanto desecho puede llegar a generar el país a futuro.
- Generar propuestas que permitan manejar de mejor manera los residuos de instalaciones solares fotovoltaicas residenciales y del sector industrial.

1.3. LÍMITES Y ALCANCES

1.3.1. LÍMITES

- La investigación final no pretende ser una propuesta de ley en forma.
- La investigación no abarca la descripción de tecnologías utilizadas para el reciclaje.
- La proyección de residuos solo abarcará los próximos 30 años.
- La proyección de residuos y el estudio en general se basa en las células fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino.

1.3.2. ALCANCES

- El estudio deberá generar conciencia de la problemática que se podría generar en el futuro con el uso más extendido de paneles solares.
- El documento deberá aportar ideas, basadas en la experiencia en otros países, para lidiar con la problemática.
- Las suposiciones se deberán fundamentar en la información que se pueda encontrar, según las proyecciones a futuro de los planes energéticos en el país.

1.4. METODOLOGÍA

El estudio realizado se basa en una investigación cualitativa y a su vez cuantitativa. La parte cualitativa toma como base la descripción de la tecnología y los diferentes componentes que la conforman. La parte cuantitativa toma como base los análisis realizados por el IRENA y se extrapola a la realidad del país en base a la información pública disponible.

- a) Inicialmente se realiza una contextualización de la problemática abordada en el documento, que es básicamente dimensionar el problema que representa el incremento de residuos en base al crecimiento de la implementación de la energía fotovoltaica.

- b) Es necesario definir los diferentes tipos de instalaciones solares fotovoltaicas y sus diferentes particularidades, así como establecer las diferentes tecnologías de células fotovoltaicas existentes.
- c) Se usa como base el análisis del ciclo de vida para lograr dimensionar que impacto tiene la tecnología solar, desde la etapa producción hasta la etapa de desuso, en el medio ambiente. El ciclo de vida también arroja resultados sobre las cantidades de componentes usados en las plantas o instalaciones solares, aunque mucho de estos resultados se enfocan principalmente en el área de Europa.
- d) Definición de los diferentes tipos de fallas en sistemas solares fotovoltaicos permite comprender los problemas a los cuales se enfrentan estos tipos de instalaciones y permiten comprender las diferentes razones por las cuales un módulo es desechado antes de llegar al final de su vida útil esperada.
- e) Proyección de residuos que generara el país en los siguientes 30 años, esta se basa en la metodología propuesta por el IRENA y se contextualiza a la realidad nacional utilizando los datos públicos disponibles por parte del CNE, SIGET, UT y el BCR.
- f) La base normativa, uno de los resultados de la investigación es plantear las diferentes alternativas de legislación que hay disponibles de manera internacional y compararla con la realidad actual del país en materia de manejo de residuos. Se toma como base lo establecido en la normativa del MARN para la clasificación de proyectos y a partir de aquí se proponen las mejoras basadas en la información extraída de la experiencia internacional.

El trabajo plantea como resultado final las bases que motiven una legislación en forma del manejo de residuos de instalaciones de generación fotovoltaica, debido a la popularidad que está despertando en los empresarios y población general.

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO.

Las instalaciones fotovoltaicas se conforman de diferentes componentes mecánicos y electrónicos que permiten el correcto funcionamiento de estas. Los residuos que provienen de los componentes mencionados, se pueden agrupar en metales, químicos corrosivos, plástico y vidrio. Un panel solar comienza a perder capacidad llegado los 20 o 25 años de uso dependiendo del fabricante, por lo que la tendencia es cambiarlos antes que la eficiencia decaiga demasiado, esta es una práctica común en instalaciones de gran escala. Ahora existen empresas que se encargan del correcto manejo de los residuos de componentes electrónicos por ejemplo Recyclia, de España, en el año 2017 recogió 125 toneladas de paneles fotovoltaicos, recuperando 94 toneladas de vidrio, 15 de metales y 2.5 de plástico, estas tienen plantas con tecnología especializada para tratar los residuos y neutralizar agentes tóxicos. En España a partir del 2015 los fabricantes e importadores de tecnología solar fotovoltaica se ven obligados a organizar y financiar la recolección de residuos y el reciclaje de estos, medidas como estas son aplicadas en toda Europa donde el uso de paneles es bastante común y popular, estos se rigen por la ley de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment). Mundialmente se estima que los residuos de paneles, en especial el vidrio, podría alcanzar cifras de cercanas a los 78 millones de toneladas, por lo que el uso de paneles comienza a convertirse en un problema que puede causar tanto daño como otras fuentes de energía si el manejo de residuos no es legislado y controlado.

Puestos en contexto el Capítulo 2 se encarga de dar una breve descripción de todo lo relacionado a sistemas fotovoltaicos, las diferentes configuraciones y componentes asociados, este a su vez nos introduce el concepto de BOS, que son los diferentes elementos misceláneos que conforman una instalación sin considerar el panel solar y su carcasa. Algo importante a notar es que los materiales remanentes de una planta fotovoltaica varían dependiendo del lugar en el cual son instalados.

2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico consiste en un conjunto de dispositivos con los cuales se logra la generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento de la energía solar.

La energía generada es de tipo corriente directa o continua (DC), haciéndose necesario el uso de dispositivos electrónicos llamados inversores, para transformarla en corriente alterna (AC) y poder ser utilizada en viviendas o en la industria.

Ya que este sistema depende de las características inherentes a la energía recibida del Sol, es susceptible a las variaciones del clima que afectan la incidencia de los rayos solares en los paneles, por ende, también se producen variaciones en la generación de energía eléctrica.

Existen sistemas fotovoltaicos que se encuentran interconectados a la red de suministro eléctrico, en los cuales la energía generada sobrante se inyecta a la red eléctrica o viceversa

cuando la producción no alcanza a satisfacer la demanda. Existen también sistemas aislados o independientes, los cuales además hacen uso de dispositivos de almacenamiento de energía a través de baterías, sin embargo, estos tipos son más utilizados en zonas rurales que no están conectadas a la red eléctrica nacional.

2.2. TIPOS DE INSTALACIONES

Los proyectos fotovoltaicos se clasifican en dos grandes grupos según el objetivo de las mismas, estas son: Instalaciones Fotovoltaicas Aisladas de la Red, las cuales tienen como finalidad el satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica; y las Instalaciones Fotovoltaicas Conectadas a la Red, cuyo objetivo principal es el entregar la energía a la red eléctrica.

2.2.1. INSTALACIONES AISLADAS DE LA RED

Generalmente se emplean en zonas aisladas, que no tienen acceso a la red eléctrica: Instalaciones rurales, iluminación, infraestructura para telecomunicaciones, boyas de señalización y bombeo de agua. Estas instalaciones posibilitan dos tipos de suministros según sea el tipo de distribución; ya sea a través de un Sistema Centralizado, el cual satisface el suministro de un conjunto de usuarios; o a través de un Sistema Descentralizado, con el cual se realiza la instalación de sistemas individuales para cada una de las viviendas o usuarios, sin embargo, esta última resulta más costosa. Este tipo de instalaciones requieren también de sistemas de almacenamiento de energía.

2.2.2. INSTALACIONES CONECTADAS A LA RED

Para este caso, la red eléctrica actúa como un disipador de energía infinita y acepta toda la energía disponible que proporciona el sistema fotovoltaico, esto puede ser tanto de centrales fotovoltaicas como de los instalados en viviendas y edificios. Este sistema no necesita de subsistema de almacenamiento y requiere de condiciones de funcionamiento diferentes a los aislados, y el sistema de regulación cumple la función de indicar al inversor de energía la disponibilidad en cada momento en los paneles (el punto de máxima potencia).

2.2.3. INSTALACIONES HÍBRIDAS

Estos sistemas combinan los módulos fotovoltaicos de forma que estos pueden almacenar energía como también entregar energía a la red. Este sistema es más fiable que los anteriores, ya que, al disminuir la captación y generación de electricidad del sistema fotovoltaico, el suministro no se ve comprometido al ser complementado por la energía proveniente de la red.

2.3. ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.3.1. MÓDULO SOLAR (PANEL SOLAR) FOTOVOLTAICO

Constituye el elemento básico para la producción de electricidad y generalmente consta de un bloque donde se encuentra encapsulado el conjunto de células fotovoltaicas. Además, sirve como protección contra los agentes ambientales externos, ofrece una resistencia

mecánica ante los posibles daños que puedan sufrir los componentes principales y garantiza la seguridad de los usuarios mediante un aislamiento eléctrico. Por otra parte, asegura una estanqueidad suficiente respecto a las células, además de favorecer la captación de radiación y la evacuación del calor, de manera que sea posible obtener un máximo rendimiento.

Los tipos de células fotovoltaicas más usados son las de primera generación (mono-Si y mc-Si) y las de segunda generación (a-Si, CdTe, GaAs, CIGs, CdS y bifaciales), nombradas así dependiendo del material semiconductor del que se construyen.

- **Celdas de Silicio**

El silicio es fundamental en la electrónica, por ende, las celdas que contienen este material son las más utilizadas, razón por la cual también poseen mayor mercado. Dentro de esta categoría se encuentran (Castrol Gil, Carpio Ibañez, Guirado Torres, Colmenar Santos, & Davila Gomez, 2004):

IMAGEN 1 TIPOS DE CELDAS DE SILICIO ((ECOFENER, 2019))



a. Monocrystalino (mono-Si)

A diferencia del silicio monocrystalino de grado electrónico, el cual consiste en un monocristal perfecto de alta pureza de silicio (ver Imagen 1); el silicio monocrystalino de grado solar consiste en un monocristal de pureza ligeramente inferior, ideal para aplicaciones fotovoltaicas por su rendimiento y precio más barato. En condiciones ideales, los rendimientos que alcanzan este tipo de células, ronda 18%, sin embargo, comercialmente rondan 12%.

b. Policristalino o multicristalino (mc-Si)

Estas celdas se encuentran construidas por pequeños cristales elementales (ver Imagen 1), teniendo un rendimiento en de alrededor de 9%. Este tipo de celdas son las más empleadas en la actualidad.

c. Amorfo (a-Si)

Poseen un costo inferior, dado el proceso de producción más simple. Su rendimiento promedio es del 5% y se utilizan para bajos requerimientos como juguetes, calculadoras, relojes, entre otros (ver Imagen 1).

A nivel general, entre las celdas de Silicio, el porcentaje de silice que representa cada tipo de celda es el siguiente:

- Silicio Policristalino (Aproximadamente 50 %).
- Silicio Monocristalino (Aproximadamente 35 %).
- Silicio Amorfo (Aproximadamente 9 %).
- Cinta o lámina de Silicio Cristalino (Aproximadamente 6 %)

- **Celdas de Teluro de Cadmio (CdTe)**

Se encuentran formadas por una película delgada cuyo espesor ronda las micras (ver Imagen 2). Se componen de un compuesto cristalino de telurio y cadmio, que se intercala con sulfuro de cadmio para formar la unión PN. Su rendimiento ronda 17%, siendo la mayor competencia para las celdas de silicio; sin embargo, poseen el inconveniente que requieren de más superficie comparando con los paneles de silicio, además de la posibilidad de generar mayor impacto ambiental dado que el cadmio es un metal altamente tóxico, esto sumado a que el telurio presenta cierto nivel de escasez.

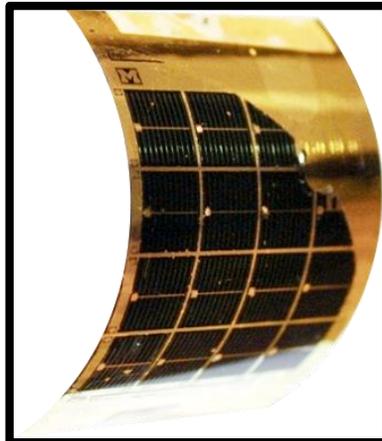
IMAGEN 2 CELDA DE TELURO CADMIO (EMPA, 2011)



- **Celdas de Arseniuro de Galio (GaAs)**

Este tipo de celdas, pueden mantener su rendimiento en altas temperaturas y soportar radiaciones ionizantes, al contrario de los paneles de silicio, son delgadas y su aspecto es como se muestra en la Imagen 3. A pesar que su rendimiento puede alcanzar un 27%, requieren de un largo proceso de desarrollo por su alto precio y materiales escasos.

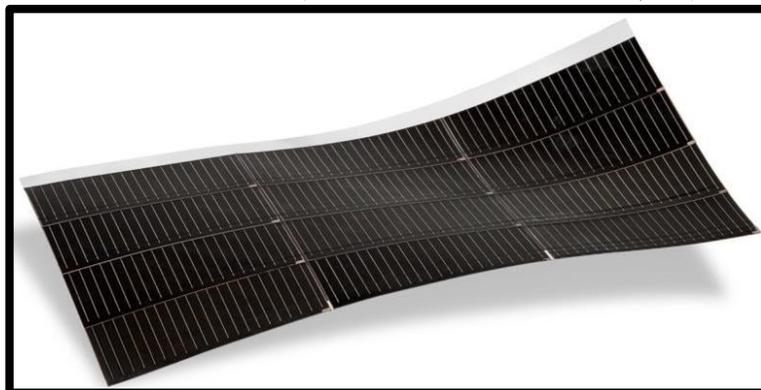
IMAGEN 3 CELDA DE ARSENIURO DE GALIO (NANOFLEX'S SOLAR TECHNOLOGY, 2020)



- **Celdas de Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS y CIS)**

Son celdas de película delgada, sus rendimientos rondan entre 12% y 20%. Poseen también costo de fabricación menor y pueden ser aplicables tanto para elementos rígidos como el vidrio y para elementos flexibles como polímeros (ver Imagen 4).

IMAGEN 4 CELDA CIGS (ECOINVENTOS GREEN TECHNOLOGY, 2018)



- **Celdas bifaciales**

Poseen una unión doble (NPN) y pueden absorber tanto la radiación frontal como la reflejada por el suelo, por lo que poseen mayor rendimiento, alcanzando 30% experimentalmente.

A menudo son más duraderos porque ambos lados son resistentes a los rayos UV y las preocupaciones de degradación inducida por potencial (PID) se reducen cuando el módulo bifacial no tiene marco (Ver Imagen 5).

Se espera que la tecnología bifacial represente un tercio de la producción global de módulos solares para 2022.

Existen también celdas que se encuentran en investigación o aún no han alcanzado a comercializarse en grandes cantidades, por lo que se les denomina de “tercera generación”.

IMAGEN 5 CELDAS BIFACIALES SIN MARCO (ALCUBIERRE, 2009)



- **Celdas de concentración**

Usan un sistema de lentes que les permite enfocar y concentrar la luz solar en las celdas (Ver Imagen 6). Se les llama también “CPV”. Se componen de silicio o arseniuro de galio, que, aunque tienen mucha eficiencia, su costo es también elevado.

IMAGEN 6 CELDAS DE CONCENTRACIÓN PARABÓLICAS (SITIO SOLAR, 2013)



- **Celdas sensibilizadas por colorante**

Se les conoce como celda solar de Graetzel o DSSC Dye-Sensitized Solar Cell, en inglés. Se encuentran construidas por un pigmento de dióxido de titanio que absorbe la luz solar (ver Imagen 7).

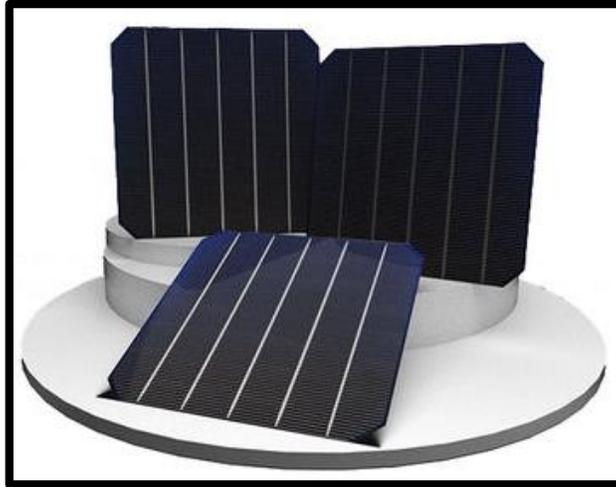
IMAGEN 7 CELDA SOLAR DE GRAETZEL (ROMANDE ENERGIE / MEDIACOM, 2013)



- **Celdas PERC y PERL**

Estas son celdas de alta eficiencia que mejoran la reconducción de la recombinación de portadores tanto por la parte frontal como por la parte posterior de las celdas (ver Imagen 8). Obtienen una eficiencia superior al 20% aunque también presentan un alto coste.

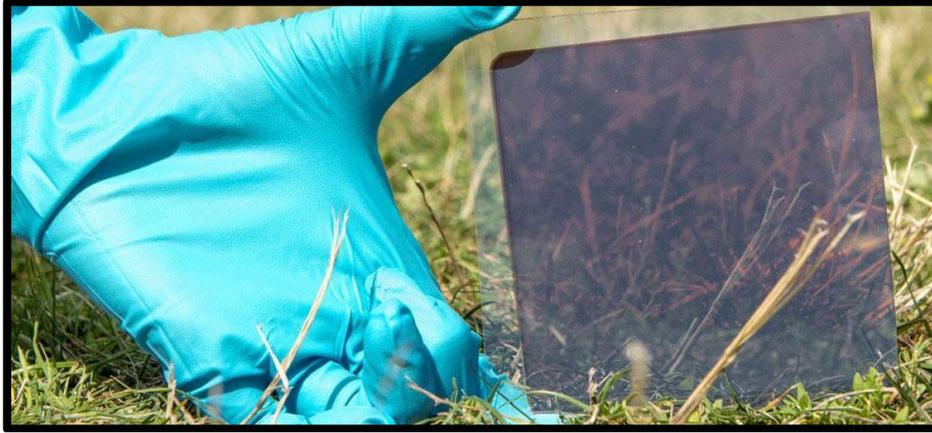
IMAGEN 8 CELDA PERC (SCHMID EXPECT SOLUTIONS, 2020)



- **Celdas de Perovskita**

Su aplicación en paneles fotovoltaicos fue descubierta en el año 2009 cuando se utilizaron en celdas sensibilizadas por colorante mediante pigmentos que facilitaban la absorción de la luz solar (ver Imagen 9). Permite alcanzar una eficiencia del 20% en los mejores casos, pueden emplearse en el recubrimiento de celdas convencionales con lo cual se mejora el rendimiento hasta un 32%. Tiene un bajo costo, con lo que se podría aplicar ampliamente en contra de otras tecnologías, incluso si no alcanzan mejores valores de eficiencia.

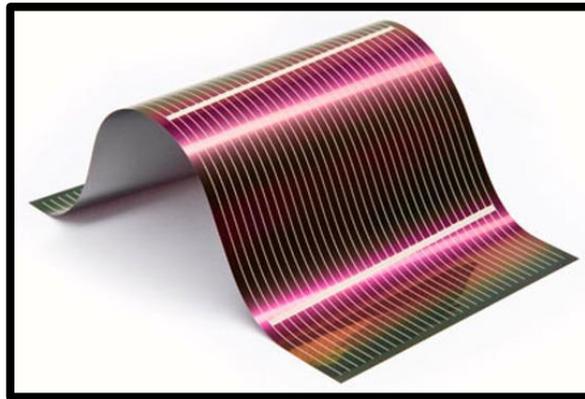
IMAGEN 9 CELDA DE PEROVSKITA (SÁNCHEZ SERRADILLA, 2014)



- **Células orgánicas**

Compuestas de materiales biodegradables como polímeros orgánicos o pequeñas moléculas orgánicas (ver Imagen 10). Tienen un bajo coste por los requerimientos bajos en cuanto a materiales y proceso de fabricación. A pesar de esto, su rendimiento es solamente alcanza el 5% y presentan la problemática de una rápida degradación de las celdas.

IMAGEN 10 CÉLULA ORGÁNICA (IZQUIERDO MORELOS, 2016)



- **Celdas híbridas**

Estas presentan una combinación de semiconductores orgánicos e inorgánicos. En la siguiente tabla (Tabla 1), se resumen los rendimientos de las células en función de la tecnología. Vemos que los mayores rendimientos se obtienen para las células de concentración (CPV), seguidas por las células de silicio cristalino, no obstante, las primeras aún no tienen gran aplicación comercial pues están en fase de desarrollo y mejora.

TABLA 1. EFICIENCIA DE MÓDULOS SEGÚN SU TECNOLOGÍA.

Tecnología	Eficiencia Comercial	Eficiencia a Escala de Laboratorio
c-Si Monocristalino	13-19	25
c-Si Policristalino	11-18	20.4
CIGS/CIS	7-12.7	20.3
CdTe	11	16.7

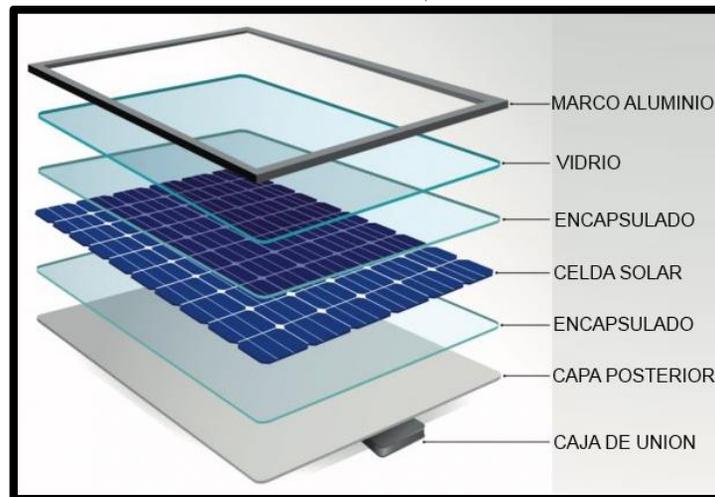
Tecnología	Eficiencia Comercial	Eficiencia a Escala de Laboratorio
a-Si – $\mu\text{c Si}$	7-9.8	11.9-13.2
a-Si	4-8	10.4
CPV Mult unión	25	25-30
Celdas sensibles por colorante	2-4	8-12

Fuente: Paiano, 2015

Es muy conocido ya, que la generación de electricidad se logra debido a la combinación de celdas conectadas en serie y paralelo, pues las celdas colocadas de forma aislada no proporcionan la suficiente energía eléctrica. La combinación de celdas deber ser tal que se logren parámetros con los cuales no se tengan descompensaciones que limiten su rendimiento.

Es por esto que el panel constituye el elemento básico para producir electricidad y se encuentra conformado por bloques de celdas fotovoltaicas que se encuentran encapsuladas, con el fin de tener protección contra los elementos externos, además de dar resistencia mecánica ante cualquier daño. Esto además de otras características como captación de radiación y evacuación del calor.

IMAGEN 11. PARTES DEL PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO (ECOINVENTOS GREEN TECHNOLOGY, 2019)



Como puede apreciarse en la Imagen 11, en términos generales, un panel se encuentra formado desde su parte superior, por el vidrio templado el cual debe ser resistente a impactos y a altas temperaturas, permitiendo el paso de la luz solar, que permita también una limpieza fácil y rápida.

En la capa posterior del panel se encuentra construida de materiales como vidrio o fluoruro de polivinilo, que da resistencia y protege de factores externos como la humedad.

El encapsulado, como su nombre lo indica, cubre las celdas y demás conexiones, formando una protección a su vez que une las partes. Generalmente se utiliza etilvinilacetato (EVA), silicona, o polivinilo. Su función debe ser también la de permitir el paso de la radiación solar,

pero protegiendo también de la radiación ultravioleta y ser hermético para aislar los componentes de la humedad (Escuela Moreno, 2017).

Finalmente se encuentran los elementos con los cuales se conecta el panel; estos son cables, bornes, cajas de unión, etc. y elementos de protección que aseguran que la conexión sea segura.

2.3.2. INVERSOR

Adapta la corriente producida por el módulo fotovoltaico aislados, así como las baterías (corriente continua), a las condiciones de alimentación que requieren las distintas cargas (corriente alterna o continua). También adapta la inyección a la red de distribución, cuando se tiene inyección al sistema. El inversor de voltaje utiliza circuitos electrónicos para hacer que el flujo de la corriente continua cambie de dirección de forma periódica haciéndola similar a la corriente alterna. El inversor además emplea una serie de filtros para hacer que estos cambios de dirección sean suaves y regulares de forma que la energía eléctrica resultante puede ser usada en la mayoría de dispositivos eléctricos domésticos.

2.3.3. ACUMULADOR DE CARGA (BATERÍA)

Su función es el almacenar la carga eléctrica, permitiendo consumirla durante períodos en los cuales la demanda puede exceder la capacidad de producción del módulo fotovoltaico, o simplemente cuando no existe generación. Los principales tipos son Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio, Níquel-Hierro, Plata-Cadmio y Zinc-Óxido de Plata.

Cada vez se hace creciente la necesidad del uso de un acumulador de carga, la red eléctrica puede ser inestable y cuando hay fallas en esta es de gran utilidad. Pueden ocurrir fenómenos meteorológicos o mantenimiento de la red que provoquen el falle de la red.

2.3.4. REGULADOR DE CARGA

Para sistemas aislados, la función del regulador de carga es el dirigir y controlar la cantidad de energía entre la batería y los módulos fotovoltaicos. Protegiendo la batería al proporcionar una carga adecuada y evitando sobretensiones.

2.3.5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

Consiste en utilizar componentes como diodos de bloqueo o interruptores de protección, con la finalidad de proteger la instalación contra sobrecargas y descargas que se produzcan por un fallo (Escuela Moreno, 2017).

2.4. BOS INSTALACIÓN

A groso modo podemos definir el Balance del Sistema BOS (por sus siglas en inglés Balance of System) como una evaluación de todos los componentes mecánicos, eléctricos y hardware que constituyen un sistema fotovoltaico exceptuando los paneles solares. El resto de componentes de la instalación como se ha mencionado anteriormente consiste en el inversor, los cables que transportan la electricidad, la estructura sobre la cual se apoyan los paneles y

elementos electrónicos de protección. Es fácil intuir que dependiendo del tipo de instalación algunos accesorios extra son necesarios, como lo puede ser la necesidad de un acumulador y regulador; inclusive la manera en que la estructura es colocada puede variar dependiendo de si hablamos de paneles montados en techo o paneles colocados al nivel del suelo o incluso aquellos que son usados como fachada de edificio, en instalaciones más nuevas. El tipo de célula fotovoltaica también se relaciona con la estructura a utilizar, según el material será necesario usar materiales más o menos robustos, un ejemplo de esto son los módulos de silicio que necesitan estructuras de aluminio para dar estabilidad estructural y garantizar una fácil instalación, por otro lado, tenemos que con módulos de CdTe un soporte de vidrio es suficiente para sustentarlos (Fthenakis & Kim, 2010).

Debido a que el objetivo final es comprender y dimensionar la cantidad de elementos que contiene una instalación fotovoltaica es importante evaluar los diferentes tipos de instalación mecánica que existen y entender las ventajas y desventajas que conlleva cada una de esta solución, además esto nos permite ver como cada tipo de instalación conlleva a diferentes tipos de materiales utilizados.

2.4.1. MONTAJE

- **Instalaciones montadas en el suelo firme.**

Es el tipo de montaje que podemos ver en las grandes extensiones de terreno llano, un buen ejemplo de este tipo de plantas solares son Espica y Antares de grupo NEOEN (véase Imagen 12). Aquí se montan grandes líneas de módulos firmemente apoyadas al suelo.

IMAGEN 12. INSTALACIONES DE ANTARES (HERNÁNDEZ, 2016)



- **Instalaciones montadas en postes.**

Este tipo de instalaciones como su nombre lo indica, los paneles se colocan en estructuras verticales como postes, similares a los del tendido eléctrico, son principalmente usadas en áreas urbanas donde no hay suficiente espacio, la Imagen 13 nos muestra un ejemplo de este tipo de instalación. (Chaaban, 2018)

IMAGEN 13. INSTALACIONES EN POSTES (CHAABAN, 2018)



- **Instalaciones sobre techo plano (sin penetración en techo).**

Estas instalaciones son utilizadas cuando el techo es una losa de concreto plana y se genera una estructura sobre este para colocar los paneles solares a una inclinación adecuada, la estructura sobre la cual se monta es similar a las utilizadas en instalaciones en suelo firme, tómese la Imagen 14 como ejemplo. Se utiliza por lo general estructuras de concreto para garantizar la resistencia a fuertes vientos. En este caso el panel no forma parte íntegra del techo por lo que no se considera que exista una penetración de este. (Chaaban, 2018)

IMAGEN 14. INSTALACIONES DE PANELES EN TECHOS (CHAABAN, 2018)



- **Instalaciones alineadas a techo (Penetración en techo).**

Estas instalaciones son usadas cuando el techo posee cierta pendiente y los paneles se alinean a esta, utilizando la estructura de este como apoyo para los paneles, dejando una solución muy estética y que reduce los materiales estructurales y resuelve el problema del espacio, este tipo de instalación se dice que hay penetración en el techo debido a que usa las vigas que lo sostienen para apoyar los módulos, los cuales muchas veces rompen la cubierta para llegar a la estructura. Actualmente en el país esta solución es muy utilizada en plantas industriales,

ejemplo de esto son la Megaplanta Vijosa, las instalaciones en Avícola Campestre y las de Grupo Miguel (Imagen 15). (Chaaban, 2018)

IMAGEN 15. INSTALACIONES ALINEADAS AL TECHO (GRUPO MIGUEL)



Hay mucha información de los tipos de instalación de paneles solares. Cada una de ellas afecta los parámetros de diseño y la cantidad de energía producida afectando el valor de “Payback Time” (Fthenakis & Kim, 2010), pero más importante para el estudio realizado en el documento es que los materiales a utilizar son diferentes. En la Tabla 2 se hace una comparación entre los distintos tipos de instalación y sus ventajas como desventajas.

Es importante notar que para cada tipo de instalación debe llevar a cabo un plan que considere la generación de los residuos al final de la vida útil de los paneles solares, a la vez es muy útil una lista de materiales y balance del sistema para cada tipo de instalación que se proyecte a futuro.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE INSTALACIONES (ELABORACIÓN PROPIA)

Características \ Tipo de Instalación	Suelo Firme	Poste	Losa	Techo inclinado
Buena ventilación y enfriamiento de los módulos	✓	✓	✗	✗
Instalación segura (no hay trabajo en alturas)	✓	✓	✗	✗
No penetra el techo	✓	✓	✓	✗
Fácil orientación para optimizar producción.	✓	✓	✗	✗
Fácil ajuste de inclinación.	✗	✓	✓	✗
Pequeño uso de la tierra.	✗	✓	✗	✗
Bajo costo en soportes	✗	✗	✓	✓
Optimización del uso del espacio (el techo)	✗	✗	✓	✓
Solo puede acceder personal autorizado	✗	✗	✓	✓
Facilidad en la ruta del cableado	✓	✗	✓	✗
No se debe considerar la acción del viento	✓	✗	✗	✗

2.4.2. COMPONENTES MECÁNICOS

Los componentes mecánicos comprenden aquellos elementos que son necesarios para montar la estructura que dará soporte a los módulos y demás componentes eléctricos. El objetivo de este apartado es dar a conocer diferentes componentes que son usados en el montaje de módulos de acuerdo al tipo de instalación según se vio en el apartado anterior.

- **Estructuras en Instalaciones sobre techo con penetración**

La instalación mecánica usada en las estructuras montadas en techos con pendientes es a base de rieles estructurales los cuales forman el esqueleto mecánico que soporta los elementos. El sistema se sujeta a la estructura de vigas de hierro del techo por medio de escuadras en forma de “L”(véase Imagen 17 para ejemplo) que permiten dar cierta elevación a los módulos y así se consigue una mejor ventilación y se evita que estos alcancen temperaturas elevadas. Además, se necesitan otros elementos como tuercas, pernos, juntas de unión para extender los rieles, ganchos para teja (alternativa a las escuadras en forma de “L”), como los que se ven en la Imagen 16; anclas los cuales permiten el armado de las filas de paneles y terminan de dar firmeza al conjunto. (Chaaban, 2018)

IMAGEN 16. EJEMPLO DE GANCHOS PARA TEJA (CHAABAN, 2018)

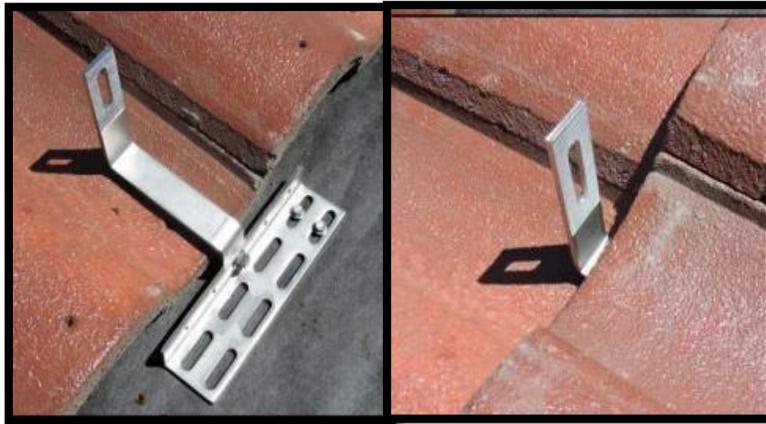
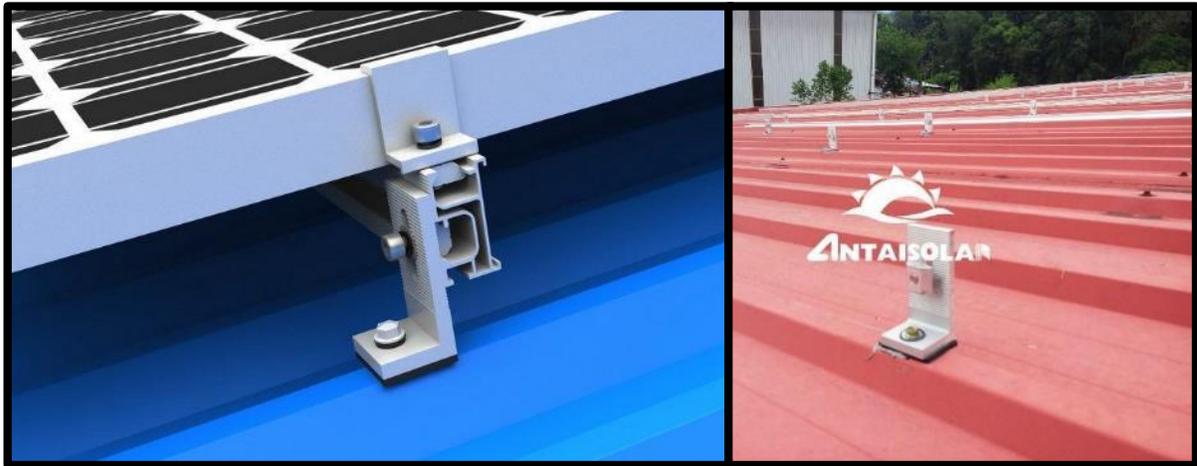


IMAGEN 17. EJEMPLO DE ANCLA TIPO "L" (CHAABAN, 2018)



- **Estructuras en Instalaciones sobre techo sin penetración**

Para el caso de estructuras en losa conformados por concreto, se usan bases de este mismo material adherido a la losa reforzada y para el caso de techo metálico plano existen anclas especiales llamadas S-5 (ver ejemplo en Imagen 18), que permiten adherirse a la estructura sin penetrar directamente a esta.

El ancla S-5 es una solución pensada para evitar penetrar la estructura del techo y puede ser instalada tanto en techo de lámina plano como en techo con cierto grado de inclinación. Un lado del ancla funciona como clic y se sujeta a los pliegues que hay en la unión de las láminas de metal del techo quedando bien sujeto por medio de prisioneros, el otro extremo se encarga de soportar y sujetar el riel.

En el caso de ser una losa de concreto, muchas veces se opta por generar una base de concreto, arena y se considera como parte del diseño estructural del mismo techo. En caso de ser estructuras pre existente, un experto debe hacer la evaluación del peso máximo que la losa puede soportar. (Chaaban, 2018)

IMAGEN 18. EJEMPLO DE ANCLA S-5 (CHAABAN, 2018)



- **Estructuras en suelo y poste.**

Este tipo de instalación requiere de bases de concreto que sostiene una armazón de hierro que se yergue para soportar los rieles sobre los cuales irán montados los paneles. En el caso de instalaciones en poste el principio es el mismo, pero en algunos casos se hace necesario que un experto dimensione la base para soportar el peso de la estructura y posibles cargas producidas por el viento.

2.4.3. COMPONENTES ELÉCTRICOS

Las instalaciones de paneles solares deben inyectar la energía que generan a una instalación, que puede ser una planta industrial, una casa o la red misma. Para dicho cometido existen diferentes componentes eléctricos y electrónicos que se encargan de conducir la corriente de la instalación, monitorear la operación y proteger la instalación de problemas eléctricos o condiciones inusuales de operación. El BOS electrónico de la instalación es pues también una fuente de materiales con vida útil por lo que se vuelve necesario comprender los componentes que aportan al final del ciclo de vida de un sistema fotovoltaico. (Chaaban, 2018)

- **Conductores.**

Los conductores de la instalación comprenden todo el cableado necesario para la interconexión de módulos, conexión con el inversor y conexión al punto de uso o de acople a la red. El cableado utilizado para unir los diferentes módulos en las cajas de registro debe ser apto para intemperie debido a que se somete a temperaturas muy elevadas y a la radiación solar, por lo que deben ser capaces de soportar más 90°C, para estos casos son necesario un tipo especial de aislamiento que lo proteja de las condiciones externas y eviten accidentes. Algunos tipos de aislamiento para el tipo de aplicación son cable USE-2, recubierto con XLPE; y cable fotovoltaico.

Los cables que se encargan de conectar las cajas de registro con el inversor o al interruptor o switch de desconexión DC van dentro de tubo “conduit” lo que los protege de las condiciones ambientales, por lo que no necesitan un aislante tan especial, pero si contar con el calibre adecuado para manejar la carga eléctrica que pasa por estos, típicamente se utilizan cables RHW-2, THW-2, THWN-2. Una vez el cableado llega al interior de un recinto con temperatura más o menos controlada se puede cambiar a cables tipo NM, NM-B o UF, siempre dentro de conducto para su protección. (Chaaban, 2018)

- **Cajas de Conexión**

Actualmente los módulos vienen con sus respectivas cajas de conexión que permiten conectarlos entre sí gracias a las terminales que sobre salen de estas. Este componente se encuentra en la parte trasera del módulo y normalmente está fabricado de plástico listo para la intemperie, diodos bypass, y tornillos para la conexión de las terminales. (Chaaban, 2018)

- **Cajas de Unión o Registro.**

Las cajas de registro están fabricadas para trabajar en intemperie y se encargan de unir las diferentes líneas de módulos solares en una sola carga eléctrica dentro de un circuito único. Está compuesta por borneras que dan fijeza a los cables provenientes de las cajas de conexión. En este tipo de cajas se suele colocar elementos de protección del tipo fusible. (Chaaban, 2018)

- **Conductos.**

Como se ha mencionado los conductos permiten llevar líneas de cable y resguardarlas de los posibles daños externos, así como de las condiciones ambientales. Estos conductos pueden ser de metal rígido, como es el caso del tubo RMC; tubo EMT, más liviano y delgado que el RMC; tubo IMC, una solución intermedia entre RMC y EMT.

También tenemos conductos no metálicos como lo son tubos de PVC, barato y liviano comparado a los metálicos; conduit no metálico rígido RNC, tubo liso robusto; coraza no metálica ENT, tubo corrugado con buena resistencia a la humedad y retardando a la flama. (Chaaban, 2018)

Capítulo 3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

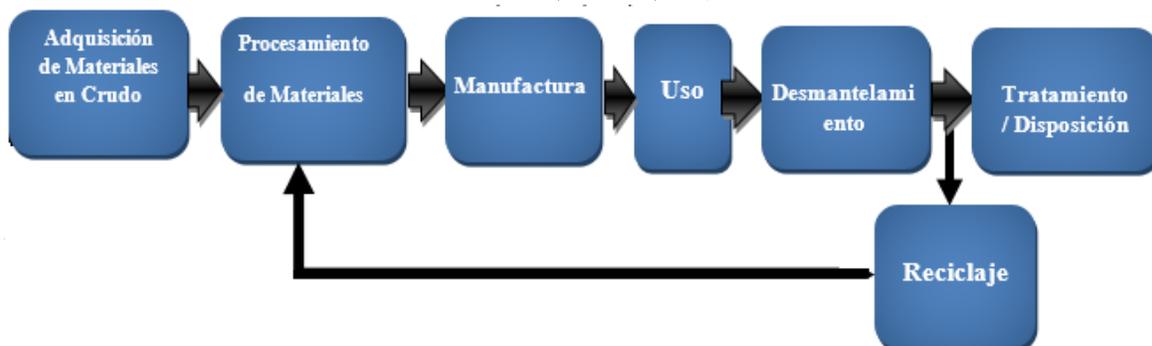
El análisis del ciclo de vida es una herramienta que sirve para considerar las diferentes entradas y salidas de un producto o proceso durante toda su vida, se suele utilizar la expresión “desde la cuna a la tumba”. Hablamos de una herramienta comúnmente usada en la medición del impacto ambiental que posee una tecnología relacionada con la transformación de la energía primaria. El capítulo se enfoca en describir brevemente todas las etapas por las cuales pasa un panel solar, desde la manufactura de una célula fotovoltaica para lograr los grados de pureza necesaria de silicio, hasta el uso en una instalación solar fotovoltaica y su posterior descarte una vez alcanzado el máximo de vida útil. El capítulo también abarca ciertas métricas usadas típicamente en un análisis de ciclo de vida para medir el impacto ambiental. Por último, se comparten los resultados de diferentes estudios que nos muestran las cantidades de material necesarios para una instalación fotovoltaica, así como la energía requerida en la manufactura de módulos solares. (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)

3.1. CICLO DE VIDA

El ciclo de vida de un sistema fotovoltaico involucra ciertas etapas, como la producción de los materiales, así como su proceso de purificación, la fabricación de los módulos y el balance de sistema (BOS), la instalación y uso del sistema y finalmente el desmantelamiento y disposición o el reciclaje.

El ciclo de vida de un sistema solar fotovoltaico, como se mencionó anteriormente, inicia desde la extracción de los materiales y termina con el descarte de los elementos o el reciclado de estos mismos, en la Imagen 19 se muestra un diagrama que resumen todas las etapas. En general el estudio planteado pretende enfocarse principalmente en la fase final, puesto que, en El Salvador esta tecnología está disponible por medio de importación no sufriendo directamente el impacto de la manufactura, sin embargo, es necesario conocer el impacto que tiene la fabricación de paneles solares y los componentes de una instalación fotovoltaica en el medio ambiente. (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)

IMAGEN 19. FLUJO DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FRISCHKNECHT, ITTEN, SINHA, WILD-SCHOLTEN, & ZHANG, 2015)



De una forma simple, el ciclo consiste en la extracción del material en bruto, procesamiento y la purificación de este, la producción de los módulos, la instalación y el uso de los módulos y por último la etapa en que estos son desechados o reciclados. El análisis del ciclo de vida de un panel solar valora la energía y materiales utilizados versus las emisiones al medio ambiente o residuos resultantes de las diferentes etapas.

Entrando en detalle en el proceso de obtención de materias primas tenemos que el IEA describe que para módulos basados en silicio y CdTe inicialmente es necesario la extracción de las materias primas, como lo son arena para el silicio, lo suficientemente puro para el efecto fotovoltaico; zinc y cobre para el caso módulos con aleación de Cadmio y Teluro. A partir de la extracción de estos componentes se hace necesario la purificación hasta llegar al denominando grado fotovoltaico. Para el caso del silicio que se encuentra en los cuarzos de arena se debe fundir en un horno para alcanzar el grado metalúrgico, el proceso sigue con la purificación en el que se define si el silicio será de uso electrónico o uso solar (consiste en cristales con purezas mayores al 99.9999%) por medio del proceso denominado como “Siemens”. El cadmio y telurio para los módulos solares de CdTe se obtienen como un sub producto del proceso fundición de zinc y cobre, es necesaria la purificación de estos para que sean aptos para el efecto fotovoltaico, en este caso particular la pureza debe ser mayor al 99.999%. Proceso similar ocurre con las células de cobre, indio, galio o seleniuro, o abreviados como CIGS; donde el indio y galio son subproductos de la extracción de zinc y el seleniuro proviene de los procesos de producción de cobre. (Fthenakis & Kim, 2010)

Para el caso de módulos basados en silicio el proceso de manufactura que comprende la formación de estos, se divide en tres etapas conocidas como oblea, célula y módulo. La parte de oblea consiste en tomar lingotes de sílice purificada a grado fotovoltaico, mono cristalino o poli cristalino, cortarlo y formarlo en obleas de 0.2 mm de espesor. Una vez en la etapa de célula, se crea un dopaje por medio de pastas metálica con el objetivo de crear un enlace p-n y dar así propiedades eléctricas al silicio puro. La parte final que sería la creación del módulo consiste en la conexión de diferentes células de manera electrónica y física para ser encapsuladas en vidrio y plástico. Para la instalación de un sistema fotovoltaico es necesaria

la fabricación de una estructura que soporte los paneles, conexión eléctrica entre estos, inversores para ajustar el comportamiento de la electricidad generada y el cableado para unir todos los módulos o conjunto de estos. Es claro que al final del ciclo de vida de un sistema fotovoltaico la cantidad de materiales con un valor importante es bastante alta. (Fthenakis & Kim, 2010)

3.2. INDICADORES LCA

3.2.1. DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA

Consiste en la demanda de energía primaria acumulada a lo largo del ciclo de vida de un sistema fotovoltaico. La energía primaria se define como la energía proveniente de los recursos naturales, como el carbón, el petróleo crudo, uranio, gas natural; que no ha sufrido ninguna transformación antropogénica y que requiere de ser convertido y transportado para poder convertirse en energía que pueda ser utilizada. (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)

3.2.2. TIEMPO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN DE LA ENERGÍA

Se define como el período requerido por un sistema de energía renovable, para generar la misma cantidad de energía primaria equivalente, que fue utilizada para producir el sistema en sí. (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)

$$\textit{Tiempo de Retorno de Energía} = \frac{(E_{mat} + E_{manut} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL})}{\frac{E_{agen}}{\eta_G} - E_{aoper}}$$

Donde:

E_{mat} : Demanda Primaria de Energía para Producir los Materiales que Comprenden el Sistema Fotovoltaico.

E_{manut} : Demanda Primaria de Energía para la Manufactura del Sistema Fotovoltaico.

E_{trans} : Demanda Primaria de Energía para el Transporte de los Materiales Utilizados Durante el Ciclo de Vida.

E_{inst} : Demanda Primaria de Energía para la Instalación del Sistema.

E_{EOL} : Demanda Primaria de Energía de la Administración del Ciclo de Vida.

E_{agen} : Generación Anual de Energía.

E_{aoper} : Demanda Anual de Energía para Operación y Mantenimiento en términos de Energía Primaria.

η_G : Eficiencia de la Red, Eficiencia Promedio de Conversión de Energía Primaria a Electricidad de la Demanda.

El cálculo de la energía primaria equivalente requiere de conocimiento específico de cada país, parámetros de conversión de energía para combustibles y tecnologías utilizadas para generar la energía y la materia prima.

El EPBT se ve afectado por factores como el tipo de instalación, si es sobre techo o en un terreno plano; la irradiación de la zona, la ubicación global afecta a la cantidad de irradiación

recibida; la tecnología a utilizar, mono o poli cristalino. Al norte de Europa el EPBT es de 2.5 años y al sur de 1.5 años. Estudios más viejos (Alsema, Wild-Scholten, & Fthenakis, 2006) establecían que para el Sur de Europa los valores de EBPT eran de 1.7 años para tecnología mono y poli cristalina, en el caso de CdTe el valor estaba en 0.8 años. Datos más actuales nos muestran que para el 2014 el EBPT ha pasado a ser de 1 año para poli cristalino y poco más de un año para mono cristalino. (Frischknecht, Itten, Sinha, Wild-Scholten, & Zhang, 2015)

3.2.3. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Consiste en la estimación de la emisión de los gases de efecto invernadero que son generados durante el Ciclo de Vida de un sistema fotovoltaico, los cuales son medidos en equivalentes de CO₂, usando un tiempo integrado horizonte de 100 años. Para el caso de los sistemas solares y sus componentes los momentos en los cuales consumen combustibles fósiles y electricidad es en la etapa de producción, es en ese momento cuando se producen emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), entre otros. Estudios muestran que la energía primaria consumida en la producción europea de mono cristalino y poli cristalino, para el año 2005, era de 4200 y 3700 MJ/m², respectivamente, mientras que la generación de gases de efecto invernadero rondaba los 30-45 g CO₂-eq/kWh, en el caso del BOS para aplicaciones sobre techo las emisiones alcanzaban rangos de 4.5-5 g CO₂-eq/kWh. (Louwen, G.J.H.M. van Sark, Faaij, & Schropp, 2016)

Los gases de efecto invernadero han tenido una tendencia difícil de rastrear a lo largo de los años, puesto que se utilizan diferentes criterios para el cálculo de los g CO₂-eq/kWh. Un dato estimado es de 20 g CO₂-eq/kWh para poli cristalino y 25 g CO₂-eq/kWh para mono cristalino. En el año de 1992 el panorama era muy diferente y para el caso del poli cristalino se tenía un valor estimado 143 g CO₂-eq/kWh, en el caso del mono cristalino, para el año de 1986, se tenía un valor de 409 g CO₂-eq/kWh. (Louwen, G.J.H.M. van Sark, Faaij, & Schropp, 2016)

3.3. ANÁLISIS BOS

Los análisis BOS comprende el dimensionamiento de los diferentes materiales que componen un sistema fotovoltaico, es decir que muestra las masas provenientes del resto de componentes que comprenden la instalación, tales como soporte estructural, cableado, cajas de conexión, concreto, etc. Este además incluye el balance energético de dichos componentes.

En la mayoría de estudios que evalúan los desechos provenientes de plantas fotovoltaicas se hace énfasis en el panel solar y muchas veces se deja de lado los materiales que provienen del resto de componentes, en análisis del ciclo de vida se pone mucho énfasis en los materiales y conversión de energía primaria utilizada para obtener materia prima, depuración y producción de los módulos solares, pero analizar el resto de elementos fundamentales para la operación de la planta se deja de lado. Afortunadamente existen ciertos casos de estudios

que permiten bosquejar la cantidad de materiales usados por unidad de potencia, en concreto se exponen dos estudios que a grosso modo nos dan una idea de cómo la disposición de paneles afecta los resultados.

En el año 2006 se hizo público un estudio realizado por Tucson Electric Power (TCP) para la planta de Springerville Generating Station en Arizona, la cual posee una capacidad instalada de 3.5 MWp con módulos de células de silicio mono cristalino instalados en el suelo. El estudio es básicamente un levantamiento BOS con un detallado balance de energía consumido para la planta (Tabla 3). (Fthenakis & Kim, 2010)

TABLA 3. CANTIDADES DE MASAS DE MATERIALES POR COMPONENTES DE UN PV (FTHENAKIS & KIM, 2010)

Balance del Sistema	Masa (kg/MWp)	% del Total
BOS		
Soporte Estructural PV	16,821	10.3
Interconexiones de Módulos	453	0.3
Cajas de Conexión	1,385	0.8
Conductos y accesorios	6,561	4.0
Cableado y Dispositivos de Tierra	5,648	3.4
Inversory Transformadores	28,320	17.3
Conexiones a la Red	1,726	1.1
Instalaciones de Oficina	20,697	12.6
Concreto	76,417	46.6
Misceláneos	5,806	3.5
TOTAL	163,834	100.0
Marco*	18,141	

*Basado en 12.2% de eficiencia nominal para Módulos mc-Si.

El segundo caso de estudio es planteado por de Wild-Scholten y compañía, el cual analiza dos escenarios diferentes de montaje en techo de módulos fotovoltaicos. En ambos se plantea módulos mono cristalinos de Silicio con dimensiones 1001mmX1675mm, 220 Wp, la diferencia radica en que en un sistema es montado sobre el techo ya existente de la edificación en una estructura pensada para este (haciendo un símil con la instalación del techo plano) y el otro hace las veces de tejas siguiendo la pendiente del techo y cubriéndolo. El último supone un ahorro en estructura debido a que usa como base el cuerpo del techo. (Fthenakis & Kim, 2010)

TABLA 4. BALANCE DEL SISTEMA (BOS) PARA MONTAJES EN Y SOBRE TECHO (FRISCHKNECHT, ITTEN, SINHA, WILD-SCHOLTEN, & ZHANG, 2015)

	Sobre Techo		En techo	
	Phönix, TectoSun	Schletter, Eco05+EcoG	Schletter, Plandach 5	Schweizer, Solrif
(a) Sistema de Montaje (kg/m²)				
Acero de baja aleación	0	0	0	0
Acero inoxidable	0.49	0.72	0.28	0.08
Aluminio	0.54	0.97	1.21	1.71
Concreto	0	0	0	0
Marco	3.04	0	0	0
		Helukabel, Solarflex 101.4 mm ² , DC	Helukabel, NYM-J, 6 mm ² , AC	
(b) Cableado (g/m²)				
Cobre	83.0		19.9	
Elastomero termoplástico (TPE)	64.0		0.0	
PVC	0.0		16.9	
		Philips PSI 500 (500 W)	Mastervolt Sun Master 2500 (2500W)	
(c) Inversor (g)				
Acero	78		9800	
Aluminio	68.2		1400	
Cobre	2			
Policarbonato	68			
ABS	148			
Otros Plásticos	5.4			
Placa de Circuitos Impresa	100		1800*	
Conector	50			
Transformador, Alambre enrollado	310		5500	
Bobinas	74			
Diodo Transistor	10			
Capacitor, Película	72			
Capacitor, Electrolítico	54			
Otros componentes	20			

* Incluyendo componentes eléctricos

3.4. INVENTARIOS CICLO DE VIDA

El inventario de ciclo de vida se define como el material y la energía de entrada y salida durante el ciclo de vida de un sistema solar fotovoltaico de Silicio, ya sea poli o monocristalino, laminas y de cadmio telurio. Se ha hecho un inventario para la producción de módulos de silicio cristalino en oeste de Europa bajo un proyecto llamado Crystal Clear. La Tabla 5 presenta un inventario del ciclo de vida simplificado para 2006, cuyos datos fue compilado de once plantas europeas y 2 estadounidenses. (Fthenakis & Kim, 2010)

TABLA 5. MATERIALES Y ENERGÍAS DE ENTRADA PARA PRODUCIR 1 M² DE MÓDULO INCLUYENDO LAS PÉRDIDAS EN EL PROCESO. (FTHENAKIS & KIM, 2010)

Categoría	Inputs	Multi-Si	Mono-Si	CdTe
Componente(kg)	Celdas	1.6	1.5	0.065
	Vidrio	9.1	9.1	19.2
	Acetato de vinil	1	1	0.6
	otros	1.8	1.8	2
Consumible(kg)	Gases	2.2	7.8	0.001
	Líquido	6.8	6.6	0.67
	Otros	4.3	4.3	0.4

Categoría	Inputs	Multi-Si	Mono-Si	CdTe
Energía	Electricidad (kWh)	248	282	59
	Oil (l)	0.05	0.05	0.05
	Natural gas (MJ)	308	361	-

En lo que respecta a la categoría componente, se observa que el módulo creado de Cadmio – Telurio ocupa grandes cantidades de vidrio de hasta 19.2 kilogramos versus 9.1 de Poli y Mono cristalino de Silicio.

En la categoría consumible, el módulo monocristalino, ocupa más recurso siendo el mayor de estos proveniente de gases.

En término de energía, igualmente el módulo monocristalino de Silicio gasta hasta 282kWh, seguido de 248kWh del módulo policristalino, aproximadamente 5 veces más energía que el de Cadmio- Telurio. Sin embargo, estos son más eficientes a la hora de la generación de energía eléctrica y puede compensar este gasto.

Capítulo 4 FALLAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los paneles solares fallan por muchos motivos que pueden estar relacionados a diferentes causas externas y problemas de fabricación. Podemos encontrar fallas que se originan en la forma en que estos son conectados, el embalaje, el transporte, defectos de fábrica y hasta podemos ver imperfecciones en la producción cuyos efectos ya son tomados en cuenta por el fabricante a la hora de etiquetar los módulos y definir la capacidad nominal que estos pueden ofrecer, esto último no es una falla en sí, pero son anomalías de las cuales es importante estar consiente para evitar juzgar mal la operación de un panel.

Este apartado pretende mostrar los diferentes problemas y motivos por los cuales un panel solar puede ser descartado antes de llegar a cumplir su vida útil, lo que al final se deriva en que muchas de las instalaciones actuales ya producen cierta cantidad de residuos que debe valorarse de alguna manera. El capítulo se enfoca en las fallas más comunes del panel solar, de naturaleza externa, intrínseca a su fabricación y se enfocará en las fallas más típicas en las células basadas en silicio.

4.1. DEFINICIÓN DE FALLA DE MODULO FOTOVOLTAICO.

A la hora de evaluar la problemática sobre los residuos provenientes de una planta solar, por lo general se piensa en la disposición final de los diferentes componentes de esta, pero esto asume que ninguno de los componentes presentará fallos durante toda la etapa de uso. Lo cierto es que los paneles solares son los componentes más vulnerables a sufrir diferentes fallos producto de diferentes factores tanto externos como otros más ligados a su manufactura y las condiciones de uso. Es por ello importante definir que es la falla de un módulo solar fotovoltaico.

Según el IEA define una falla del módulo fotovoltaico como: “... *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)

Es importante hacer la aclaración de que no se consideran fallas a los problemas que surgen por el mal manejo del equipo o acciones externas como lo puede ser el vandalismo o el mal mantenimiento de la instalación, aunque para los efectos del estudio estas fallas tienen peso puesto que el resultado es un módulo solar desechado, por la instalación, para el que actualmente no existe un plan y no se da la relevancia que merece el destino final de este. Es de aclarar que esta parte profundizara en los fallos más técnicos que se relacionan con el fin de la vida útil temprana de un módulo y cuya razón están más ligada a la garantía y perdida precoz de potencia final. (Köntges, y otros, 2014)

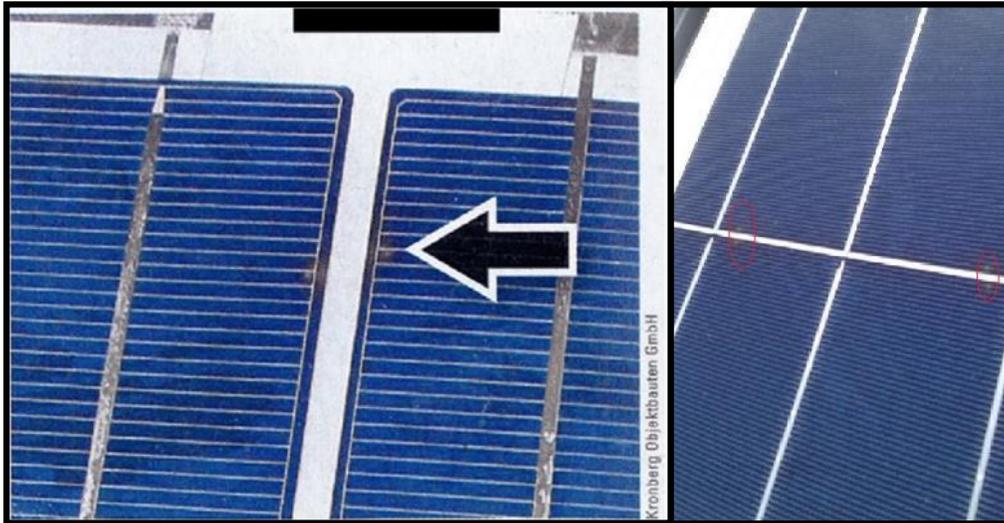
4.2. PROBLEMAS QUE NO GENERAN FALLA TERMINAL EN LOS MÓDULOS

Hay defectos provenientes del proceso de manufactura que inciden en la estética del módulo e incluso son responsables de que el desempeño de este no sea el máximo deseado, pero no llegan a ser trascendentales ni a poner en riesgo la instalación, fallas de este tipo por lo general son tomadas a consideración en la capacidad nominal y se encuentran dentro de los márgenes de tolerancia sugeridos por el fabricante, además estas no se van haciendo más críticas con el tiempo ni aceleran la degradación del panel.

Hay detalles visuales como manchas de color café, Imagen 20, en los bordes del módulo que se originan en el proceso de producción, cuando la célula solar es transportada para la colocación de la maya o capa anti reflejo y no generan mayores inconvenientes en la operación del equipo. Este detalle no se propaga ni termina por acortar la vida del módulo.

Un defecto que, si afecta al desempeño del módulo solar, puesto que la potencia final se ve reducida, es la degradación inducida por la luz en el silicón cristalino debido al efecto de los átomos boro y oxígeno contenidos en el cristal. No se considera una falla debido a que dicha pérdida debe ser considerada por el fabricante en la especificación final del producto según la norma EN 50380.3. (Köntges, y otros, 2014)

IMAGEN 20. MANCHAS CAFÉ EN LOS BORDES DEL PANEL. (KÖNTGES, Y OTROS, 2014)



4.3. FALLAS FÍSICAS DEBIDO A CONDICIONES EXTERNAS

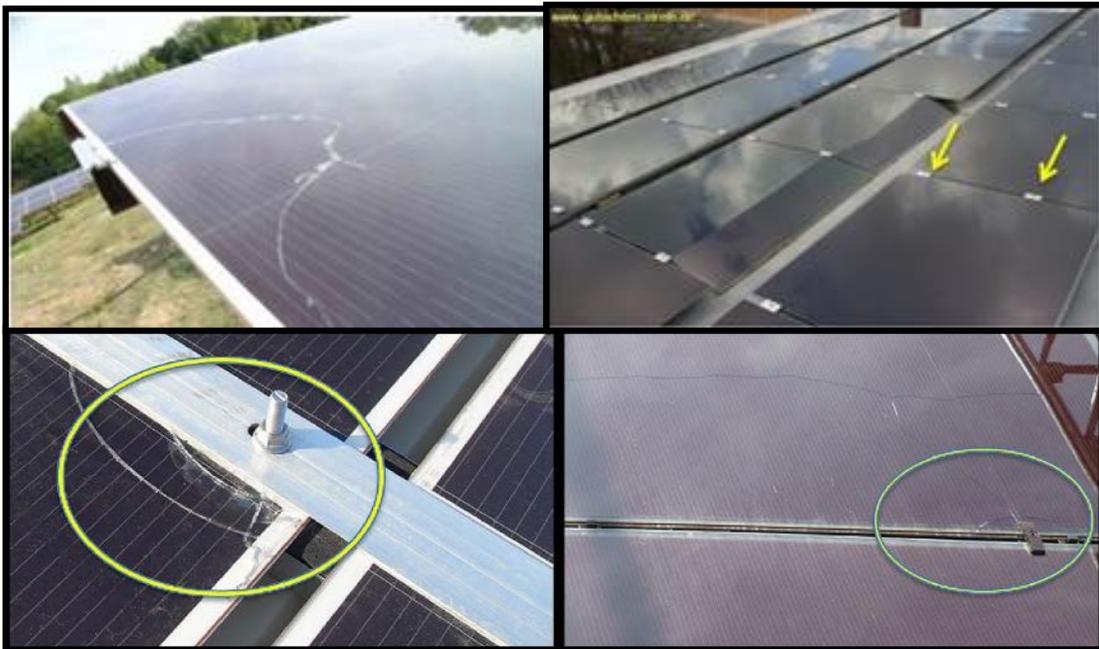
Las fallas físicas de los módulos fotovoltaicos pueden ser originadas, por el instalador, debido a la acción de la naturaleza, rayos, nieve; o por acciones vandálicas, balas perdidas, piedras; etc. Son importantes para nuestro estudio debido a que fuerzan deshacerse del módulo en sí. Las fallas más comunes según el estudio del IEA serían las descritas a continuación. (Köntges, y otros, 2014)

4.3.1. ANCLAJE Y SOPORTE DE MÓDULOS

Es muy común ver como el vidrio de los paneles solares descubiertos, se rompe debido a las anclas y uniones mecánicas como se muestra en la Imagen 21. Muchas veces esto ocurre como consecuencia del uso de anclas con aristas muy finas que causan la rotura al presionarse para sujetar firmemente el panel, de igual manera si las anclas son muy delgadas o cortas pueden generar concentradores de esfuerzo lo que termina originando la rotura del vidrio, en ocasiones los anclajes y uniones se ponen a distancias que no son las sugeridas por el fabricante. De igual manera si durante la instalación o mantenimiento se aprietan demasiado fuerte terminarían por romper el vidrio.

La mayor consecuencia de estas roturas es una pérdida en la eficiencia debido a la corrosión, a la cual los paneles se ven sometidos debido a la entrada de oxígeno y humedad en estos. A partir de estas roturas es difícil de determinar si el módulo seguirá aislado cuando llueva, lo que deriva en peligro de cortocircuito y hasta de incendio. Por último, debemos añadir que este tipo de incidencias terminan por generar el sobrecalentamiento del módulo debido a los puntos calientes donde el vidrio está roto y el panel expuesto a la intemperie. (Köntges, y otros, 2014)

IMAGEN 21. PANELES CON VIDRIO ROTO POR ANCLAJE. (KÖNTGES, Y OTROS, 2014)



4.3.2. TRANSPORTE E INSTALACIÓN.

En la etapa inicial de ejecución de un proyecto fotovoltaico la mayor fuente de daños es durante el transporte y la manipulación del componente a la hora de instalarlos, es en esta etapa temprana donde el vidrio del módulo o la célula fotovoltaica en si misma pueden llegar a romperse debido a los esfuerzos a los que se pueden llegar a ver sometidos. El vidrio roto en el transporte o instalación es fácil de detectar y se puede proceder al cambio, pero el daño

en células es evidente hasta que la decoloración del módulo empieza a evidenciarse, lo que termina en una pérdida de capacidad de generación.

Los módulos pueden sufrir de daños en la célula sin ver afectado el vidrio que las envuelve, esto puede pasar por caídas durante transporte o instalación, que sean mala apiñados cuando son transportados, que sean presionados contra las esquinas del contenedor mientras son transportados, que alguien se pare sobre ellos o los use de apoyo; los motivos pueden ser muchos y en muchas ocasiones son accidentes que ocurren y de los cuales es difícil tener control, otras ocasiones será culpa de un mal manejo o un mal servicio profesional. (Köntges, y otros, 2014)

4.3.3. FALLAS EN LOS CONECTORES RÁPIDOS

Al final de las cajas de unión, que poseen los módulos, vienen unas terminales que se conocen como conectores rápidos y que permitan añadir cable para conectar las líneas de módulos entre sí, hacia el inversor, añadir cable, etc. Estos conectores no están estandarizados por lo que en muchas ocasiones el problema surge al añadir cable extra, conectar cajas de fusibles, registros e inversores que no son compatibles con el tipo de conexión rápida del módulo, haciendo que la amenaza de un cortocircuito o una desconexión estén presentes.

Las consecuencias de una mala instalación de las conexiones rápidas es que deriven en la pérdida de líneas enteras de producción y en el peor de los casos cortocircuitos que puede llegar a derivar en incendios debido a que en muchas ocasiones los módulos pueden encontrarse cerca de materiales inflamables como madera, hierba o grama seca. Según Schmidt y compañía en su trabajo “PV-Brandschutz” muestran que en un estudio estadístico sobre 75 casos de incendio en sistemas fotovoltaicos las probabilidades que la causa origen del incendio sean los conectores rápidos es del 29%, bastante cercano al 34% que supone el resto de elementos del módulo. (Köntges, y otros, 2014)

4.3.4. RAYOS.

Los rayos eléctricos provenientes de tormentas también pueden llegar a dañar al panel solar, dejando inútiles a los diodos de bypass y creando así una condición insegura durante la operación. En ocasiones es posible observar como un módulo afectado directamente por un rayo se rompe o se quema dejándolo completamente inútil, además de la ya mencionada apertura del circuito de diodos de bypass que se puede surgir por acción indirecta del rayo. Las fallas mecánicas generan puntos calientes que luego terminarían afectando a la generación de la instalación. (Köntges, y otros, 2014)

IMAGEN 22. IMAGEN 12: EJEMPLO DE PANELES GOLPEADOS POR UN RAYO (KÖNTGES, Y OTROS, 2014)



4.3.5. VANDALISMO.

Un problema habitual en las instalaciones en suelo firme, es que se ubican en áreas abiertas donde alguien ajeno al personal de la instalación puede entrar y ocasionar toda clase de daños a esta. En campo abierto es normal ver paneles dañados por balas perdidas, piedras arrojadas desde la calle, animales que afectan al cableado y conexiones, excretas de aves migratorias. Este tipo de problemas se da principalmente en instalaciones ubicadas en campo abierto al costado de la carretera como es el caso de Antares y Espica del grupo NEOEN, las cuales tienen que lidiar con este tipo de incidentes que en muchas ocasiones terminan obligando a realizar un cambio de panel.

4.4. FALLAS GENERALES DE PANELES SOLARES

A continuación, se describirán las fallas más comunes en los módulos solares, las cuales pueden presentarse indiferentemente del tipo de material del cual sea fabricado la célula, para luego pasar a describir las fallas particulares en las células basadas en Silicio.

4.4.1. SEPARACIÓN DE LÁMINAS.

Es un problema común que la adhesión entre las capas de vidrio, encapsulado, capas activas, capas posteriores pueda verse mermada por diferentes razones. Lo usual es que esta inicie por culpa de una mala limpieza del vidrio en el proceso de manufactura, dejando que ingrese contaminantes al entramado de capas, poco a poco la humedad entra iniciando la corrosión. La consecuencia de esto radica en una pérdida de potencia debido a que las láminas separadas interfieren con el correcto paso de la luz reflejando parte de esta y reduciendo la corriente del circuito. Los efectos se pueden notar fácilmente de manera visual cuando el problema está muy avanzados, véase Imagen 23, aunque existen métodos más técnicos que permiten predecir y detectar de manera temprana estos problemas, como lo puede ser el uso de rayos x y cámaras termográficas. (Köntges, y otros, 2014)

En el caso particular de los paneles con encapsuladas en EVA (etileno acetato de vinilo) es más probable que el desprendimiento se da entre este último y la célula solar debido a que la unión con el vidrio es más fuerte y estable. Esto suele ocurrir debido a la degradación por culpa de los rayos UV a los cuales el panel debe verse expuesto, lo que conlleva a un

desprendimiento gradual que puede ser más o menos acelerado dependiendo de la manufactura o problemas en esta.

El mayor peligro de la separación de láminas o capas es que una vez la parte posterior del panel comienza a separarse genera el riesgo que las células solares entren en contacto con elementos eléctricos, como lo es el cableado, o incluso el desprendimiento de la caja de unión, lo que puede derivar en un cortocircuito y un eventual incendio. Además, la exposición de la parte trasera pone en riesgo al personal encargado del mantenimiento de la instalación debido a que las células quedan expuestas. (Köntges, y otros, 2014)

IMAGEN 23. SEPARACIÓN DE LÁMINAS (KÖNTGES, Y OTROS, 2014)



4.4.2. PÉRDIDA DE ADHERENCIA EN LA CAPA POSTERIOR.

Similar a lo descrito en la separación de las láminas, perder la capa posterior del panel implica perder la protección que tiene este contra la intemperie y pone en riesgo la vida de los trabajadores, debido a que los componentes electrónicos del módulo están expuestos y pueden generar un accidente. Este tipo de falla suele suceder cuando el proceso de adherencia es mal llevado o ejecutado, por una mala preparación de las células solares antes de ser adheridas a la capa trasera, la lámina protectora final no está bien colocada o es sensible a los rayos UV, el agua que pudo haber entrado en el proceso de fabricación formando burbujas que terminan por dañar el adherente. En lugares húmedos o épocas del año especialmente húmedas, en las noches suele formarse gotas de rocío las cuales pueden escurrir en el interior del panel produciendo la separación de láminas y por ende la separación de la capa posterior.

Como se mencionó esta falla, así como la separación de láminas pone en peligro la vida de los usuarios puesto que se ven expuestos al paso de corriente DC, pero también el módulo como tal se ve expuesto a la intemperie, en específico el agua, la cual puede llegar hasta la caja de unión y producir un cortocircuito que afecte a toda la instalación. La separación de la capa posterior y la gradual entrada de humedad y agua degradan el panel y en muchas ocasiones lo dejan inoperable forzando su reposición. (Köntges, y otros, 2014)

4.4.3. FALLO EN LA CAJA DE UNIÓN

La caja de unión es el componente ubicado en la parte trasera y que se encarga de proteger la conexión entre las diferentes filas de células solares. Dentro de ella se encuentran los diodos de bypass que sirven para proteger a toda la fila de células de los puntos calientes y del sombreado.

Por su definición podemos ver que la caja de unión protege al panel solar y un fallo en esta puede causar graves e irreparables daños en este. Los fallos más comúnmente observados en el campo son (Köntges, y otros, 2014):

- a) La caja de unión está mal sujeta a la parte trasera del panel. Comúnmente pasa debido a que el adhesivo colocado por el fabricante no está pensado para una operación tan larga.
- b) La caja cierra mal debido a imperfecciones en la caja, producto a un proceso de manufactura deficiente.
- c) Un cableado mal hecho en la fábrica, lo que ocasione un pequeño arco eléctrico que puede terminar por quemar la conexión y en el peor de los casos iniciar un incendio.

También ocurre que se deja una mala soldadura de los contactos de las filas de las células que sirven para la interconexión, esto genera una gran resistencia calentado la caja. Los contactos mal soldados son el producto de una baja temperatura en el procedimiento o residuos de procesos previos de unión. (Köntges, y otros, 2014)

4.4.4. GRIETAS EN LAS CÉLULAS

Este defecto es inherente a las células de silicio, material que genera un cristal frágil. Durante los procesos de manufactura el fabricante esta consiente de las fisuras presentes en las células solares, aunque no son perceptible por el ojo humano, está claro que de manera intrínseca a los procesos de fabricación se producirán cierto número de grietas. Cuantas grietas o fisuras como máximo se permite tener a un módulo para considerarlo normal es un tema complejo y requiere estudios de probabilidad en el equipo, al final el fabricante se ve obligado a plantear la potencia final del módulo considerando los efectos de este. El problema radica que a mayor número de grietas existe un peligro más alto de perder capacidad de generación dentro de una célula, lo que deriva en ocasiones a perder líneas de células dentro del módulo, activando los diodos de bypass como si de un área sombreada se tratara. Con el tiempo el estrés mecánico al que se ven sometidos los paneles, ya sea por los ciclos de temperatura, la acción de viento, etc., generan una pérdida que puede alcanzar el 10% o más después de 6 años de uso. (Köntges, y otros, 2014)

4.4.5. MARCAS DE QUEMADURAS.

Estas se producen en el proceso de soldadura para unir los lazos de células entre sí, se pueden producir también debido a la rotura de estas uniones, estos problemas son ocasionados por la variación de temperaturas lo que fatiga las uniones; además pueden ocurrir por problemas de contraflujo de corriente. Lo que ocurre son puntos calientes, a medida la temperatura aumenta

se incrementa la resistencia y la soldadura comienza a dañarse mientras que la corriente sigue fluyendo a través de esta última lo que ocasiona la decoloración en el encapsulado, tanto en la parte posterior como en la frontal. Las quemaduras también ocurren por corrientes inversas, que ocurren debido al sombreado, grietas en las células y uniformidades en estas que causan que la corriente fluya en vías alternas.

El problema con las marcas de quemaduras es que se pueden seguir expandiendo y calentando el módulo e incluso el flujo de corriente se ha detenido en esta zona, lo que implica que la capacidad del módulo se ve afectada y su vida útil se ve mermada. Es criterio del propietario y el equipo de mantenimiento si el panel solar debe cambiarse por completo. (Köntges, y otros, 2014)

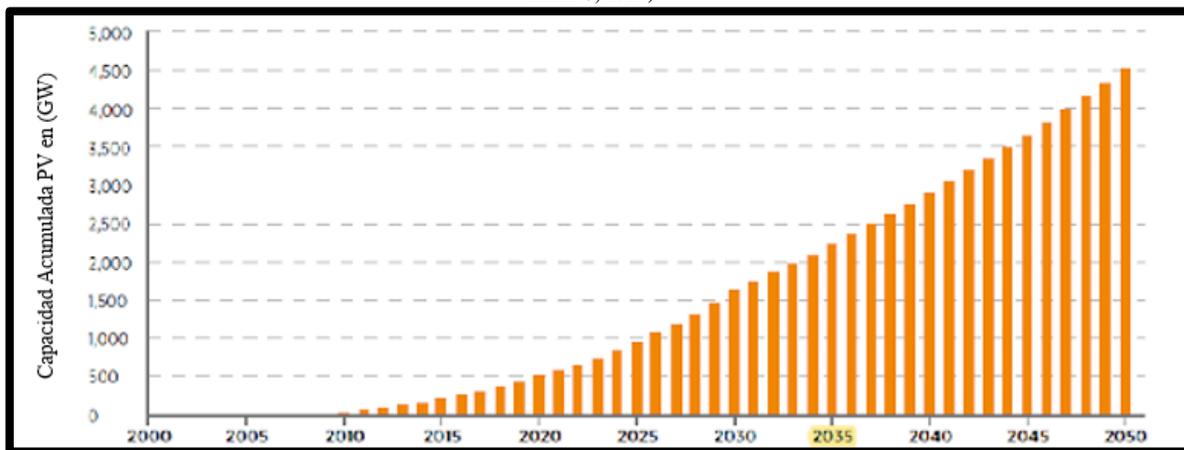
Capítulo 5 PROYECCIÓN DE RESIDUOS PROVENIENTES DE PANELES SOLARES.

5.1. PROYECCIÓN GLOBAL

Según reporte de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés) y la Agencia de Energía Fotovoltaica y Sistema de Potencia (IEA-PVPS), la capacidad de generación con energías renovables incrementó en 8.3% o 152 GW, siendo la energía solar fotovoltaica responsable de 47 GW del incremento, acumulando un total de 222 GW en energías renovables para el año 2015. Buena parte del incremento se debe a nuevos compradores y consumidores que se salen de la tendencia más tradicional del mercado. En el 2015 la tasa de crecimiento en energía solar fotovoltaica en el mercado europeo y estadounidense fue de un 5.2 % y un 6.3% respectivamente, en contraste Latinoamérica y el Caribe crecieron un 14.5%, y Asia a una tasa del 50%. Es claro que el interés por las instalaciones solares fotovoltaicas ha crecido en todo el mundo y Latinoamérica, que se podría considerar un mercado más conservador, ha tomado un papel más activo en la implementación de dichas energías alternas. A escala global tenemos que los líderes en la implementación de PV son países como China, con 43 GW de capacidad instalada; Alemania, con 40 GW; Japón, con 33 GW y Estados Unidos, con 25 GW. (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

El IRENA junto con la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), plantearon en el 2016 una proyección del incremento acumulado de la capacidad instalada de manera global, la proyección muestra datos que van a partir del año 2000 y se extienden hasta el año 2050. En dicha proyección se puede observar un incremento exponencial a partir del año 2010, planteando que para el 2030 se alcanzarán 1632 GW y para el 2050 se proyecta alcanzar una cifra de 4512 GW.

IMAGEN 24. PROYECCIÓN ACUMULADA DE LA CAPACIDAD GLOBAL DE PV (FRISCHNECHT, ITTEN, SINHA, WILD-SCHOLTEN, & ZHANG, 2015)



Los datos mostrados en el gráfico son el resultado de la interpolación de los estimados para los años 2015, 2020 y 2030, realizados en el RoadMap de IRENA. Hasta el 2030 se planteó una tasa de crecimiento de 8.92% cada 5 años. A partir del 2031 al 2050 el gráfico utiliza un crecimiento menos acelerado del 2.5%. Cabe mencionar que si se quisiera extrapolar esta situación a un país en particular las tasas de crecimiento pueden ser mayores o menores, todo depende del apoyo gubernamental hacia el desarrollo de energías renovables. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

5.1.1. PROYECCIÓN DE RESIDUOS DE PANELES SOLARES.

Se pueden identificar 4 etapas en el ciclo de vida de cualquier panel solar, las cuales son:

- Producción del panel.
- Desplazamiento del panel.
- Instalación y uso del panel solar.
- Etapa final de uso y descarte del panel solar.

Los desperdicios generados en la etapa de producción pueden ser descartados debido a que se puede asumir que las empresas tienen sus propios lineamientos a la hora de tratar cualquier tipo de desecho proveniente del proceso de producción lo que conlleva un manejo controlado de estos.

IRENA plantea un modelo de 2 pasos que da como resultado dos escenarios de estimación posibles en cuanto a volumen de desperdicio proveniente de paneles solares dañados o en desuso. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Paso 1: Considera dos aspectos fundamentales (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

- a) Estimación de los volúmenes de desperdicio de paneles solares. Se enfoca en determinar un factor de conversión promedio de la capacidad en GW a masa de paneles solares en toneladas.
- b) Estimación de la probabilidad de pérdida de un panel solar en las diferentes etapas de su ciclo de vida.

Paso 2: Utiliza los datos obtenidos del paso 1 a y b para obtener dos escenarios. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

- a) **Escenario de falla regular:** básicamente considera que la vida promedio de un panel solar es de 30 años y que estos enfrentan un 99.99% (según la literatura de Greenspec, 2016) de probabilidad de falla después de los 40 años y utiliza los parámetros de la distribución de Weibull.
- b) **Escenario de falla temprana:** este escenario siempre considera 30 años de vida promedio y 99.99% de probabilidad de falla después de los 40 años, pero añade factores en las diferentes etapas de la vida de un panel solar. Igual que en el escenario de pérdida regular, utiliza los factores de la distribución de Weibull.

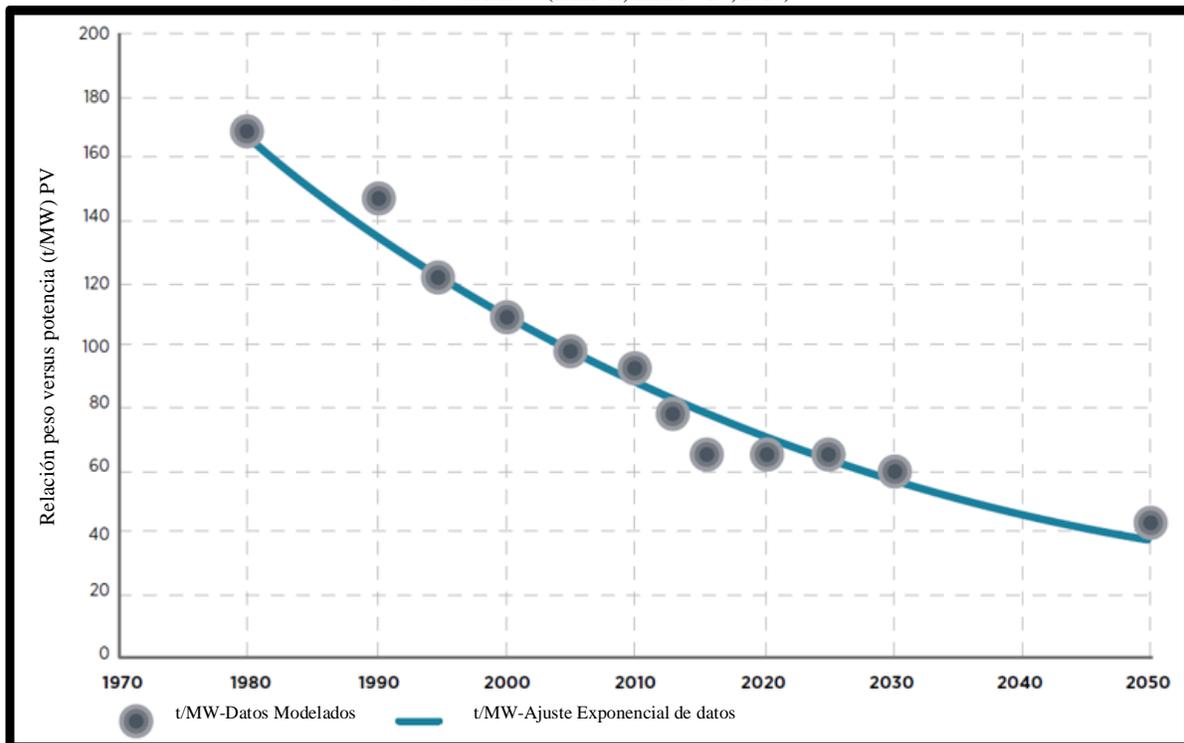
5.1.2. PASO 1 A: ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE DESPERDICIO DE PANELES SOLARES

Si bien es cierto se utiliza la palabra volumen, el objetivo final es conseguir un factor promedio de conversión de capacidad en mega watts o giga watts a masa de panel solar en toneladas por metro cuadrado. La IRENA obtiene un factor promedio en toneladas por mega watt (t/MW), el cual calculan utilizando la información disponible por parte de diferentes fabricantes de peso y capacidad nominal. En el caso de la producción de modelos anteriores de paneles solares se consideran las hojas de datos de empresas líderes en el mercado como Arco, Siemens, BP, Solarex, Shell, Kyocera, Sharp, Solarword y Trina, se promedia los datos obtenidos en intervalos de más de 5 años. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

En el caso de la producción futura de paneles solares los datos utilizados por IRENA se basan en la información publicada por estudios recientes, Berry, 2014; IEA, 2014; IRENA, 2014; Raithel, 2014; Lux Research, 2013, Beaucarne and Hoornstra, 2013. IRENA también considera una reducción del peso a medida la tecnología se desarrolle en los años venideros, optimizando la capacidad nominal por peso de los paneles y el incremento de la eficiencia. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Todos los detalles mencionados anteriormente se resumen en la siguiente gráfica, en el cual se puede ver como el peso por capacidad de panel solar va disminuyendo con el paso de los años, debido a las mejoras en la manufactura y eficiencia de los módulos solares.

IMAGEN 25. AJUSTE DE LA CURVA EXPONENCIAL DE LA PROYECCIÓN DE LA RELACIÓN PESO-POTENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)



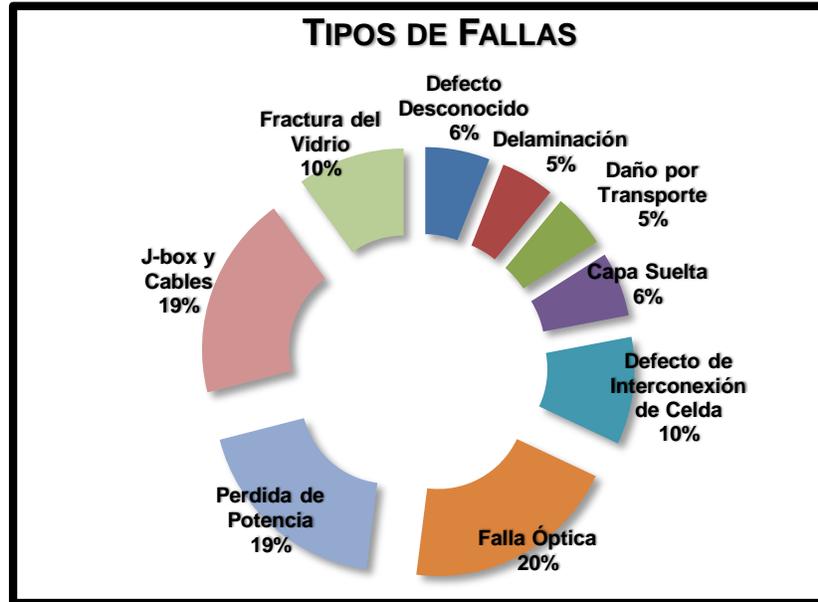
5.1.3. PASO 1 B: ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE PÉRDIDA DE UN PANEL SOLAR EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE SU CICLO DE VIDA

Según el reporte del IEA se pueden identificar tres fases de fallas en el ciclo de vida de un panel solar. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

- El **periodo de falla temprana** está comprendido por todos los paneles con fallas ocurridas en los primeros 4 años de vida de estos después de ser instalados, siendo un tiempo promedio habitual el de 2 años.
- El **periodo de falla de vida media** comprende todas las fallas ocurridas a partir de los 5 años hasta los 11 años después de la instalación.
- El **periodo de falla por desgaste** definido por todos los paneles que fallan entre los 12 y 30 años de uso después de ser instalados.

El estudio realizado por el IEA-PVPS en el 2014 arroja luz sobre las causas más comunes de fallas en los paneles solares, independientemente de la fase en la cual estos se encuentren.

IMAGEN 26. TASAS DE FALLA SEGÚN QUEJAS DE CLIENTES. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)



Si nos enfocamos en la etapa de vida infantil de un panel, tenemos que el del 0.5% al 5 % de los casos se debe a una degradación inducida por la exposición a la luz solar (defecto relacionado con la calidad de compactación de la célula), mala planificación, una mala instalación y mala colocación en la estructura de soporte. En otras ocasiones las fallas son provocadas por anomalías en el sistema eléctrico como pueden, ser una mala conexión a tierra, una mala conexión en las cajas terminales y cajas de unión, mala selección del cable, fallos en la protección del cable o controladores con defectos.

En la etapa de vida media, las fallas son producto de la degradación de la capa antirrefletores del vidrio del panel, decoloración de la capa intermedia EVA (Ethylene Vinyl Acetate) y rotura y desgaste del aislamiento. Las razones por las que el panel sufre este tipo de desgaste

son variadas y van desde la exposición a cargas mecánicas, como pueden ser el viento o la nieve; pasando por degradación por efectos de la luz, fallos en los conectores de las cajas o módulos de unión, pérdida de conexión entre las células solares, cortocircuitos y fallos en los diodos. El sistema solar fotovoltaico que entra en la etapa de desgaste sufre fallas como las mencionadas en la vida media, pero estas ahora son más frecuentes y se incrementan de manera exponencial, además se añade el desgaste natural de las interconexiones y la corrosión en los paneles. A partir del 2008 se ha vuelto muy común que los paneles presenten micro fisuras en las células que los componen, de hecho, estudios estadísticos muestran que el 40% de paneles revisados presentan al menos una célula con micro fisuras. Este último defecto se hace presente en los paneles solares más nuevos debido a los procedimientos de manufactura más actuales que permiten obtener células solares más delgadas. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

5.1.4. ESCENARIOS DE ESTIMACIÓN PARA LOS DESPERDICIOS PRODUCIDOS POR LOS PANELES SOLARES.

Como se mencionó anteriormente se plantean dos escenarios, escenario de falla regular y de falla temprano. En ambos escenarios se asume como vida promedio 30 años y se utiliza la distribución de Weibull para modelarlos, cuya ecuación se describe a continuación.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^\alpha}$$

$F(t)$ = Probabilidad de pérdida del panel solar durante su ciclo de vida.

t = Tiempo en años.

T = Vida promedio.

α = Factor de forma de la distribución de Weibull que controla la forma en S típica de esta.

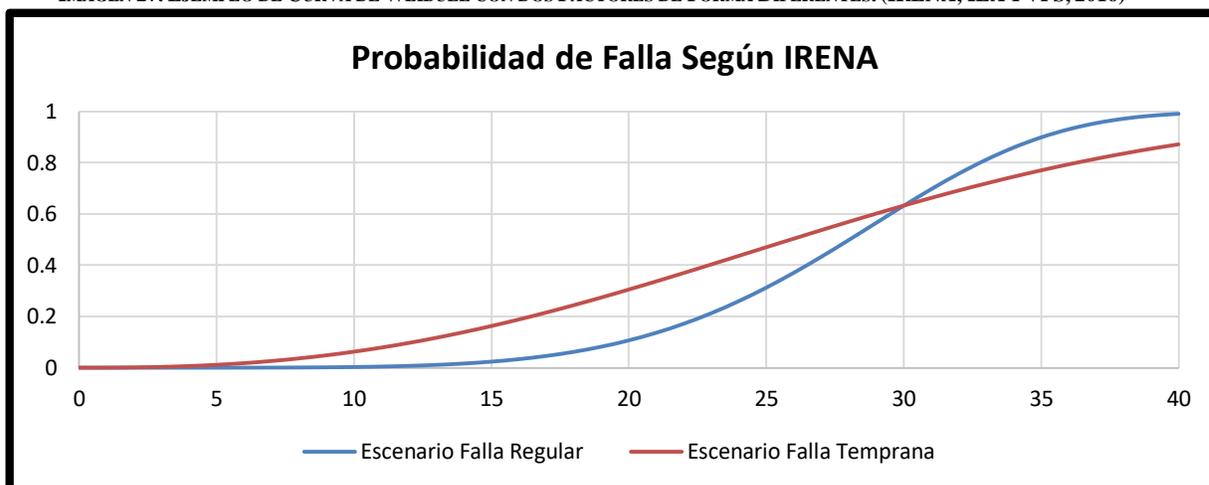
Los escenarios toman una probabilidad de falla del 99.99% una vez sobrepasada los 40 años de vida útil, tiempo después del cual los proyectos llegan a su fin o son actualizados y se hace un reemplazo general del sistema para modernizarlo. El escenario de falla regular planteado por el IRENA considera un factor de forma alpha de 5.379, estos a su vez toman como referencia el trabajo realizado por Kuitsche en 2010 “Statistical Lifetime Predictions for PV Modules”. El escenario de falla temprana considera un factor de forma alpha final de 2.4928, inferior al del escenario anterior puesto que considera los defectos en las etapas de vida temprana de los paneles, disparando así el número de elementos perdidos en los primeros 30 años de vida. Las pérdidas asumidas en este escenario son las siguientes. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

- 0.5% de paneles solares llegara al final de su vida útil por daños en el transporte de estos al sitio de instalación o uso.
- 0.5% de paneles solares llegara al final de su vida útil en los primeros dos años por culpa de una mala instalación.

- 2% de paneles solares llegara al final de su vida útil después de 10 años debido a problemas técnicos.
- 4% de los paneles solares llegara al final de su vida útil después de 15 años debido a problemas técnicos. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

El escenario de falla temprana solo considera elementos que se queden inoperativos y sea necesario reemplazarlos, es decir que no incluyen elementos con fallas menores que afectan únicamente su eficiencia, aunque en la práctica los propietarios o personal especializado definirá la política con la cual se abordan estos fallos. El modelado del IRENA simplifica el análisis y solamente considera fallas que obligan al reemplazo de la unidad. Para cada escenario se multiplica la probabilidad de falla, según la distribución de Weibull, por la masa de paneles instalados obtenida en el paso 1 a para cada año de la proyección. Se obtiene como resultado dos curvas que se encuentran en el punto de 30 años, pero cuyo comportamiento difiere en los primeros y últimos años, por ejemplo, en el escenario de falla regular tenemos un menor número de unidades que se convierten en desecho antes de los 30 años y hay un aumento considerable a medida se acerca a los 40 años, en general representa mejor la forma de una campana. Para el caso del escenario de falla temprana, debido a un factor alpha menor, da como resultado una curva de comportamiento casi lineal que nos muestra cómo se distribuye durante el tiempo de estudio las pérdidas de equipo. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

IMAGEN 27. EJEMPLO DE CURVA DE WEIBULL CON DOS FACTORES DE FORMA DIFERENTES. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)



El IRENA realiza la aclaración que el estudio llevado a cabo por ellos debe ser tomado como una guía de referencia y no como un resultado preciso, puesto que hay poca información estadística de igual manera la proyección de la capacidad instalada mundial para el año 2050 también tiene sus incertezas. Hay tres factores que pueden afectar el estudio y son descritos a continuación. La mayoría de información disponible sobre fallas en los paneles solares se limita a unas cuantas instalaciones alrededor del mundo, a medida se recopile más información alrededor del mundo será necesario actualizar la información presentada por el estudio del IRENA y será necesario tomar a consideración la evolución tecnológica de los

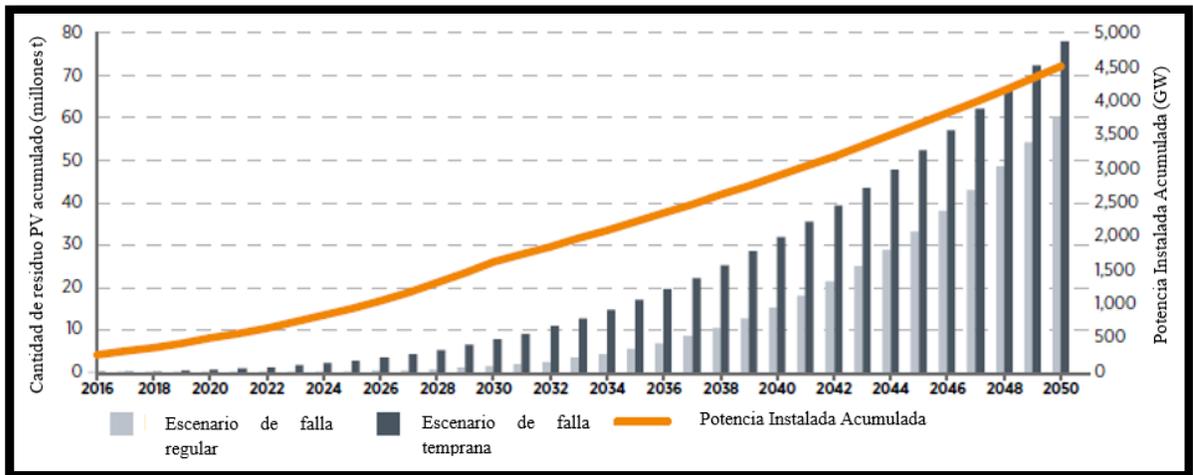
paneles solares. El estudio asume que los paneles son siempre desechados al presentar problemas, en la realidad un panel puede presentar una producción menor que cuando arranco la planta, pero en muchos casos se prefiere vivir con ese problema puesto que no siempre representar una inversión lógica o justificable. Así que una falla no implica siempre la eliminación del componente. Aspectos técnicos como este son difíciles de prever y añaden más incerteza al estudio. Los factores de forma de la distribución de Weibull, para el escenario de falla regular y temprana, son basados en estudios previos y terminan asumiendo que las pérdidas son constantes en el futuro y no considera que se hagan mejoras en el mantenimiento de la unidad para reducir estos problemas. El acumulado de los 3 factores hace necesario que el estudio se replantee cada cierto número de años y que más información sea recopilada por parte de los países y grandes plantas alrededor del mundo. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

5.1.5. PROYECCIÓN MUNDIAL DE RESIDUOS DE PANELES SOLARES

Lo anterior sirve como planteamiento de las bases seguidas por el IRENA para determinar la masa de residuos de paneles solares que se irán produciendo hasta el año 2050. La lógica es simple, ligar la capacidad instalada de manera global (Imagen 24) con la evolución de los pesos de paneles solares de silicio mostrados en la Imagen 25 y por último tomar la probabilidad de falla estimada en ambos escenarios de la Imagen 27 para obtener así las masas en toneladas de residuos provenientes de plantas solares. La Imagen 28 muestra los resultados finales de cada uno de los escenarios planteados por el reporte del IRENA.

- Para el escenario de falla regular el comportamiento plantea que a medida las plantas solares se acercan a la vida útil esperada de 30 años el incremento de la cantidad de desperdicio en toneladas se incrementa de manera más drástica. En el año 2016 se sugiere 43,500 toneladas de residuos, mientras que para el año 2050 se dispara hasta 60 millones de toneladas.
- Para el escenario de falla temprana se da como resultado un mayor número de volumen de residuos. Como se explicó inicialmente, este considera una pérdida más continua durante todo el periodo de estudio debido a las pérdidas tempranas. En contraste para el año 2016 el estudio estimaba que se producirían 250,000 toneladas de desperdicio y para el año 2050 se alcanzaría los 78 millones de toneladas de residuo. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

IMAGEN 28. VOLUMEN ESTIMADO DE LA CANTIDAD DE RESIDUOS PV ACUMULADO (IRENA; IEA-PVPS, 2016)



5.1.6. PROYECCIÓN DE RESIDUOS POR PAÍS.

El IRENA también hace una estimación de las cantidades de residuos por país, aunque solo se centra en aquellos con una alta capacidad instalada actual y sobre los cuales hay información disponible. Para la proyección el estudio implementa los mismos parámetros de la distribución de Weibull establecidos previamente en este capítulo. Lo que difieren en cada nación es la capacidad instalada al momento que el IRENA realizó el estudio y las proyecciones que estos plantean de cara al futuro en conjunto con el estudio del IRENA Remap y el planteado por el IEA´s PV Technology Roadmap. (IRENA, 2019)

La tabla 6 nos muestra un resumen de las proyecciones, usando los dos escenarios de falla, en el cual podemos ver que Asia es sin duda alguna la región que más residuos generara de cara al 2030 debido al uso intenso que se le da a esta tecnología. Por ejemplo, China se espera que tenga una capacidad instalada en energía solar de 420 GW para el 2030 lo que implica una cantidad de 200,000 toneladas (falla regular) a 1.5 millones de toneladas (falla temprana) de residuos de panel solar para el final de ese año; el continente asiático estaría produciendo de 484,000 toneladas hasta 3 millones para finales del 2030. La segunda región, según la proyección del IRENA, sería Europa que para el 2030 estaría produciendo poco menos de 2 millones de toneladas de residuos. La proyección habla poco de los países latinos siendo México el más destacado con una proyección de 6,500 toneladas a 30,000 toneladas y Brasil el más destacado de Sur América con cantidades que rondarían las 8,500 toneladas y 2,500 toneladas. (IRENA, 2019)

TABLA 6 ESCENARIOS DE FALLA ALREDEDOR DEL MUNDO. DATOS EN TONELADAS DE RESIDUOS (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Año	2016		2020		2030		2040		2050	
	Falla Regular	Falla Temprana	Falla Regular	Falla Temprana	Falla Regular	Falla Temprana	Falla Regular	Falla Temprana	Falla Regular	Falla Temprana
Asia										
China	5,000	15,000	8,000	100,000	200,000	1,500,000	2,800,000	7,000,000	13,500,000	19,900,000
Japón	7,000	35,000	15,000	100,000	200,000	1,000,000	1,800,000	3,500,000	6,500,000	7,600,000
India	1,000	2,500	2,000	15,000	50,000	325,000	620,000	2,300,000	4,400,000	7,500,000
Republica de Corea	600	3,000	1,500	10,000	25,000	150,000	300,000	820,000	1,500,000	2,300,000
Indonesia	5	10	45	100	5,000	15,000	30,000	325,000	600,000	1,700,000
Malasia	20	100	100	650	2,000	15,000	30,000	100,000	190,000	300,000
Europa										
Alemania	3,500	70,000	20,000	200,000	400,000	1,000,000	2,200,000	2,600,000	4,300,000	4,300,000
Italia	850	20,000	5,000	80,000	140,000	500,000	1,000,000	1,200,000	2,100,000	2,200,000
Francia	650	6,000	1,500	25,000	45,000	200,000	400,000	800,000	1,500,000	1,800,000
Reino Unido	250	2,500	650	15,000	30,000	200,000	350,000	600,000	1,000,000	1,500,000
Turkia	30	70	100	350	1,500	11,000	20,000	100,000	200,000	400,000
Ucrania	40	450	150	2,500	5,000	25,000	50,000	100,000	210,000	300,000
Dinamarca	80	400	100	2,000	4,000	22,000	40,000	70,000	130,000	125,000
Rusia	65	65	100	350	1,000	12,000	20,000	70,000	150,000	200,000
Norteamerica										
Estados Unidos	6,500	24,000	13,000	85,000	170,000	1,000,000	1,700,000	4,000,000	7,500,000	10,000,000
México	350	800	850	1,500	6,500	30,000	55,000	340,000	630,000	1,500,000
Cánada	350	1,600	700	7,000	13,000	80,000	150,000	300,000	650,000	800,000
Oriente medio										
Emiratos Árabes Unidos	0	10	50	100	3,000	9,000	20,000	205,000	350,000	1,000,000
Arabia Saudita	200	250	300	1,000	3,500	40,000	70,000	220,000	450,000	600,000
Africa										
Sur Africa	350	550	450	3,500	8,500	80,000	150,000	400,000	750,000	1,000,000
Nigeria	150	200	250	650	2,500	30,000	50,000	200,000	400,000	550,000
Marruecos	0	25	10	100	600	2,000	4,000	32,000	50,000	165,000
Oceania										
Australia	900	4,500	2,000	17,000	30,000	145,000	300,000	450,000	900,000	950,000
América Latina y El Caribe										
Brasil	10	10	40	100	2,500	8,500	18,000	160,000	300,000	750,000
Chile	150	200	250	1,500	4,000	40,000	70,000	200,000	400,000	500,000
Ecuador	10	15	15	100	250	3,000	5,000	13,000	25,000	35,000
Total de naciones líderes	28,060	187,255	72,160	668,500	1,352,850	6,442,500	12,252,000	26,105,000	48,685,000	67,975,000
Resto del mundo	15,440	62,745	27,840	181,500	347,150	1,557,500	2,748,000	5,895,000	11,315,000	10,025,000
Total Mundial	43,500	250,000	100,000	850,000	1,700,000	8,000,000	15,000,000	32,000,000	60,000,000	78,000,000

5.2. PROYECCIÓN REGIONAL

5.2.1. CAPACIDAD INSTALADA ACTUAL

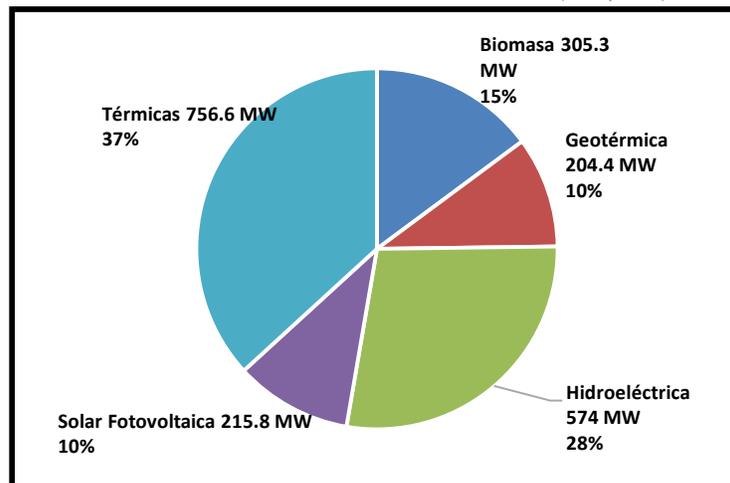
El capítulo anterior se planteaba las proyecciones realizadas por las instituciones IRENA e IEA, en las cuales se hacía ver el crecimiento de energía solar mundial y se ponderaba como la evolución de la tecnología en células solares de Silicio afectaría a la cantidad de masa que se iría generando en el futuro, las proyecciones se basan en la información disponible de cada nación en cuanto a potencia instalada y el crecimiento que estas esperan. Es entonces necesario tener una idea en qué punto se encuentra el país para poder dimensionar que tanto residuo se va generar a largo plazo.

En base a la información disponible será necesario plantear la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica instalada en el país y tomar este dato como punto de partida para una proyección de la capacidad que poseerá El Salvador en el año 2050 y así comprender que tanta masa de paneles solares desechados se tendrá durante los siguientes años.

Matriz energética actual.

En el año 2019 la matriz energética propuesta por el CNE se puede encontrar en la revista “El Salvador Ahorra Energía 10° Edición” la cual es lanzada para el período de facturación comprendido en mayo y junio de 2019. En ella se plantea la matriz de la Imagen 29, donde se puede ver como la energía solar fotovoltaica para finales del 2018 comprendía un 10% de toda la capacidad instalada en el país, con 215.8 MW producidos por esta tecnología. (CNE, 2019)

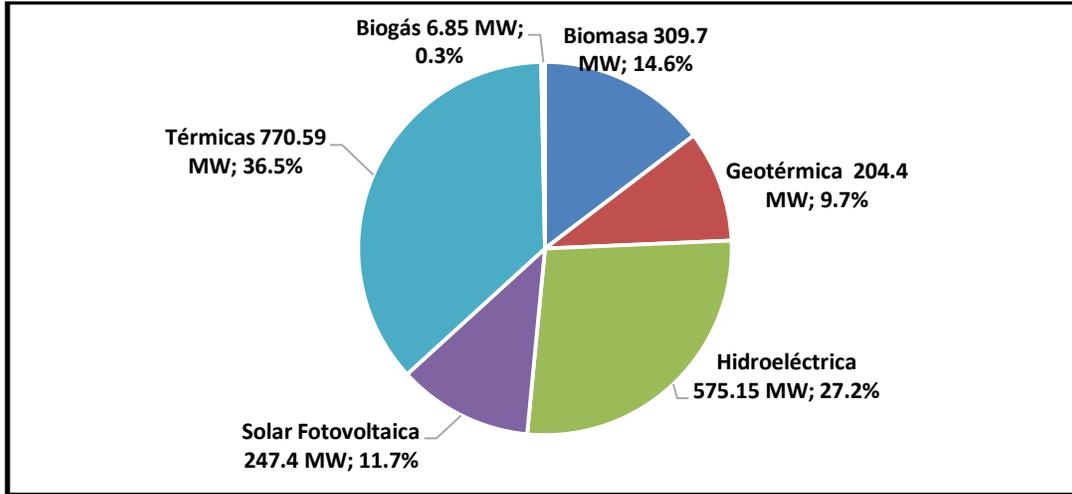
IMAGEN 29. MATRIZ ENERGÉTICA DE EL SALVADOR (CNE, 2019)



Un dato importante arrojado por el CNE es que desde el 2013 al 2018 se han incluido a la red energética 94 MW en proyectos fotovoltaicos que pertenecen al mercado mayorista y alrededor de 121.8 MW de proyectos fotovoltaicos interconectados a la red de distribución. Este dato nos arroja un poco de información de la tendencia que ha tenido el desarrollo y la aceptación de la tecnología en los últimos cinco años. (CNE, 2019)

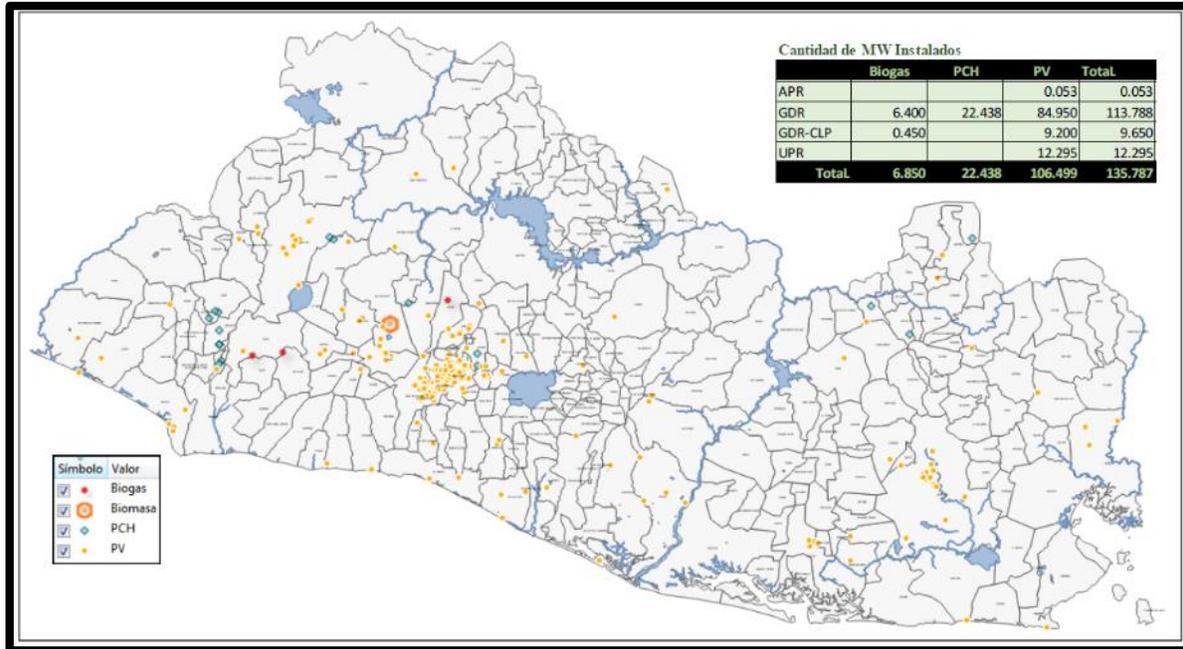
La SIGET (Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones), plantea un estudio que data del 31 de Julio de 2019, en el cual se plantea un valor diferente de la participación de la energía solar fotovoltaica en la matriz, en dicho estudio este asciende a 247.40 MW, la información según el reporte data de marzo del 2019 (Imagen 30). (SIGET, 2019)

IMAGEN 30. MATRIZ ENERGÉTICA SEGÚN SIGET A MARZO DE 2019 (SIGET, 2019)



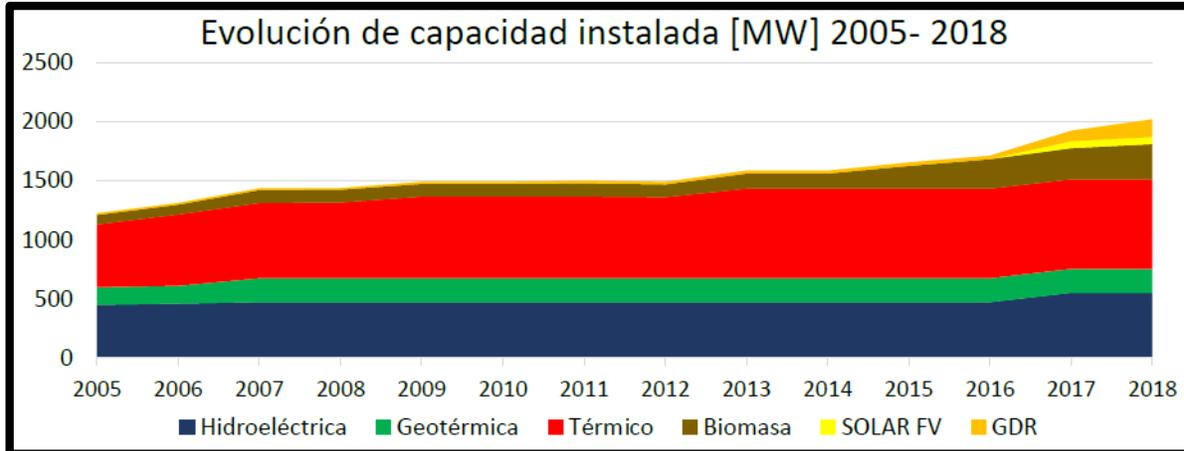
Además, se tiene un dato importante que viene de la mano del CNE, que ha recopilado en su sitio web los proyectos fotovoltaicos activos hasta la fecha que son para autoconsumo y los que se encuentran aislados de la red. La sumatoria final de la capacidad de toda esta era de 27.14 MW para el año 2013 (CNE, 2013). Por desgracia no se encuentran más datos actualizados hasta la fecha por parte del CNE. De la mano del SIGET se tiene información extra sobre los pequeños generadores de energía fotovoltaica, para el 2018 habían 106.499 MW provenientes de plantas fotovoltaicas que se conectan directamente al sistema de distribución (GDR), lo que comúnmente se denomina como mercado minorista (SIGET, 2018). La Imagen 31 nos muestra cómo estaba la distribución del mercado minorista en El Salvador para el año 2018, en la cual también se incluyen otras fuentes de energía no convencionales.

IMAGEN 31. MERCADO ELÉCTRICO MINORISTA SEGÚN TECNOLOGÍA (2018) (SIGET, 2018)



El CNE recopiló información para mostrar el comportamiento del parque de generación eléctrica en el país para el periodo del 2005 al 2018, Imagen 32. En el 2018 el CNE puso a disposición del dominio público un “Plan Indicativo de la Generación”, en el cual presentan la evolución de la matriz energética de los últimos 15 años previos a la fecha de publicación, el reporte indica que el país tenía registrado 60 MW en energía solar fotovoltaica en el mercado mayorista, cuando el reporte fue liberado en el 2018 (CNE, 2018). Lo que difiere del dato considerado en la revista “El Salvador Ahorra Energía”, la cual abarca el trimestre de junio a agosto del 2019, donde más proyectos de gran tamaño han sido iniciados y debidamente registrados (CNE, 2019) (CNE, 2019). Un patrón en el que los estudios del CNE comparten es que a partir del 2013 las energías solares fotovoltaicas han tenido un rápido crecimiento y según proyecciones planteadas en la entidad se prevé que para 2023 se añadan otros 369.9 MW a la matriz energética (CNE, 2018). Tomando como base la matriz energética del SIGET y sumando los proyectos que según el CNE están en proceso de aprobación ambiental, proyectos sobre los cuales existe un estudio de factibilidad y proyectos cuyos propietarios muestran un interés y afirman el proceder de estos la capacidad total instalada, en la matriz energética del mercado mayorista, para el 2023 sería de 617.3 MW. (CNE, 2018)

IMAGEN 32. PARTICIPACIÓN DE LAS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA SEGÚN PERIODO 2005-2018 (CNE, 2018)



Es de aclarar que parte de la información proporcionada por el CNE se basa en proyectos que a la fecha de hacer esta tesis se encuentran en proceso de construcción y algunos en gestación, haciendo que su predicción tenga cierto margen de error, además en cuanto a la participación de la energía fotovoltaica en el periodo de desarrollo de esta tesis no se toma a consideración el aporte de nuevos auto consumidores, puesto que la información disponible actual deja a varias instituciones y empresas que aportan parte de su energía sobrante a la red.

Es difícil dar con el dato exacto de cuanta capacidad en paneles solares hay instalada en el país, pero las grandes distribuidoras sí que nos arrojan una idea general de la situación para finales del año 2019.

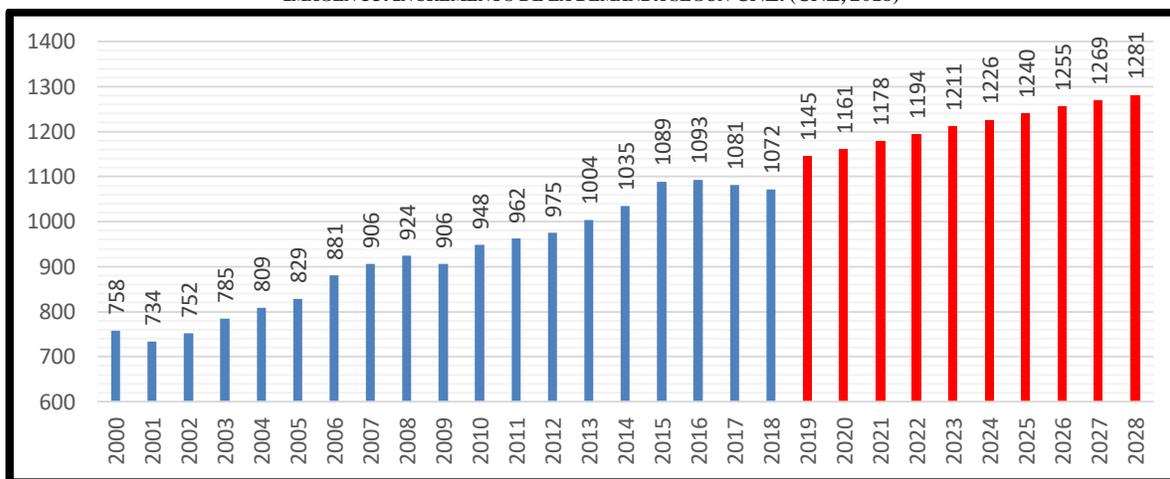
Resumiendo, la capacidad instalada final de paneles solares en la matriz energética de mediados del 2019 llega a 247.40 MW, según el boletín de la SIGET. El mercado minorista para el 2018 asciende a 106.5 MW. Para el año 2019 la capacidad instalada total del mercado mayorista de acuerdo a la documentación oficial del CNE y SIGET es de 100 MW, por consiguiente, el mercado minorista actual debe rondar los 141 MW. Para la presente investigación se tomará como base este dato y se combinará con la proyección preliminar que ejecuta el CNE para el año 2023, esto con el fin de poder dimensionar y cuantificar el crecimiento de potencia suministrada por paneles solares para el año 2050.

Evolución de la Demanda en El Salvador.

Para poder dimensionar que tanto crecerá la instalación de paneles solares en los siguientes 30 años es necesario conocer cómo se incrementa la demanda de potencia en el país, puesto que es la que terminara delimitando que tanto puede llegar a crecer el parque fotovoltaico en el país, atado a esto se encuentra la Reserva Rodante (ROR), la cual va ligada a la sostenibilidad del sistema de distribución eléctrico, puesto que es la que se encarga de regular y mantener la frecuencia cuando el recurso solar deja de estar disponible. Así pues, tenemos que cualquier proyección de potencia instalada en paneles solares se ve limitada por los dos factores antes mencionados y que se estudiarán a continuación.

Para conocer cómo se comportará en el futuro la demanda de energía eléctrica se dispone de la información que el CNE ha publicado y que arroja ciertos datos recopilados hasta 2018 y extrapolados 10 años en el futuro. La Imagen 33 muestra el comportamiento de la demanda nacional según el “Plan Indicativo de la Generación de la Expansión”, algo importante que el estudio del CNE destaca es que en el 2017 y 2018 se experimentó una disminución, según documento esta pudo deberse al incremento del uso de diferentes tecnologías renovables usadas para el autoconsumo, entre las cuales se consideran la fotovoltaica entre otras. Actualmente no hay más estudios publicados que ayuden a describir el efecto de los autoconsumidores en la demanda de potencia instalada a futuro. La Imagen 33 muestra que según el CNE continuara creciendo, pero no deja ver qué tanto de este crecimiento será absorbido por el consumidor final que decida instalar sistemas fotovoltaicos o cualquier otra fuente renovable como la biomasa. (CNE, 2018)

IMAGEN 33. INCREMENTO DE LA DEMANDA SEGÚN CNE. (CNE, 2018)

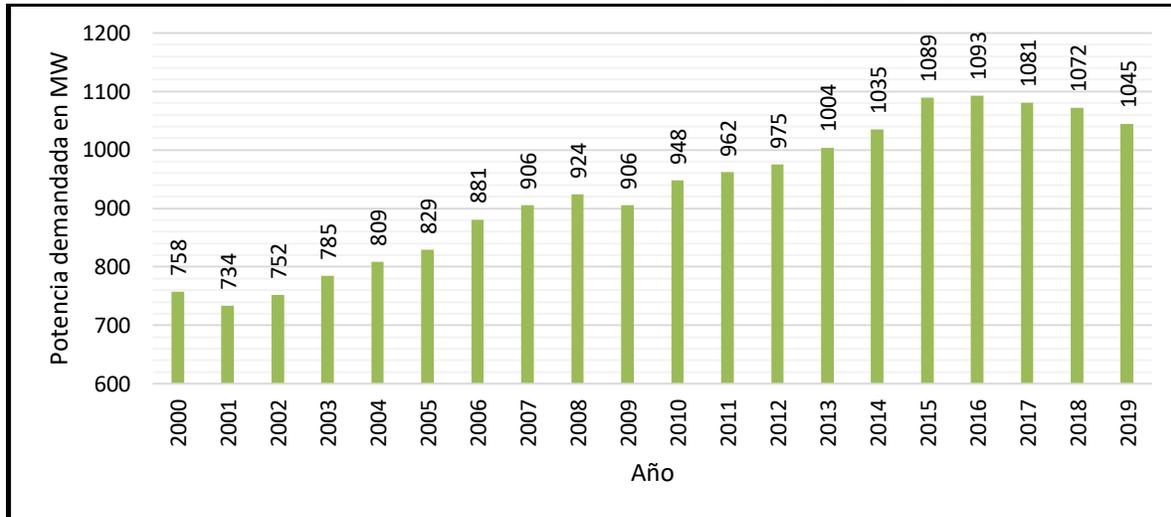


Según se vio en el apartado “Matriz Energética Actual” tenemos que para el 2016 el CNE tenía registrado alrededor de 134 proyectos como auto consumidores, estos no son proyectos residenciales sino más bien empresas y edificios los cuales cubren parte o toda su demanda con módulos solares. La capacidad instalada para el 2018 era de 106.5 MW, según registros de la SIGET.

Siempre de la mano del SIGET para el periodo de junio de 2019, véase Imagen 34, se tiene un panorama que difiere ligeramente del crecimiento planteado por el CNE para la potencia demandada por El Salvador y es que SIGET registro una menor demanda durante el año 2019 lo que indica que la tendencia a la baja de los años 2017 y 2018 se han mantenido, aunque cabe mencionar que los datos arrojados por SIGET abarcan hasta julio del 2019 (SIGET, 2019). Según la Imagen 34, la demanda del país había experimentado un decrecimiento en el 2001, la cual puede deberse a los terremotos de enero y febrero que afectaron la actividad general de la nación, el 2009 también se experimentó una disminución, pero al año siguiente la demanda volvió a crecer y se mantuvo así hasta el 2016, para los últimos años se está experimentando un fenómeno disminución. Con la información actual es difícil de predecir

qué tan alto será el impacto que tendrán los auto consumidores en el futuro, según nuevas leyes parece ser que el entorno es el propicio para que más consumidores finales tomen la decisión de instalar un sistema fotovoltaico residencial que inyecte los excesos a la red, por lo que la demanda en lugar de aumentar puede disminuir.

IMAGEN 34. DEMANDA EN MÁXIMA DE POTENCIA SEGÚN SIGET. (SIGET, 2019)



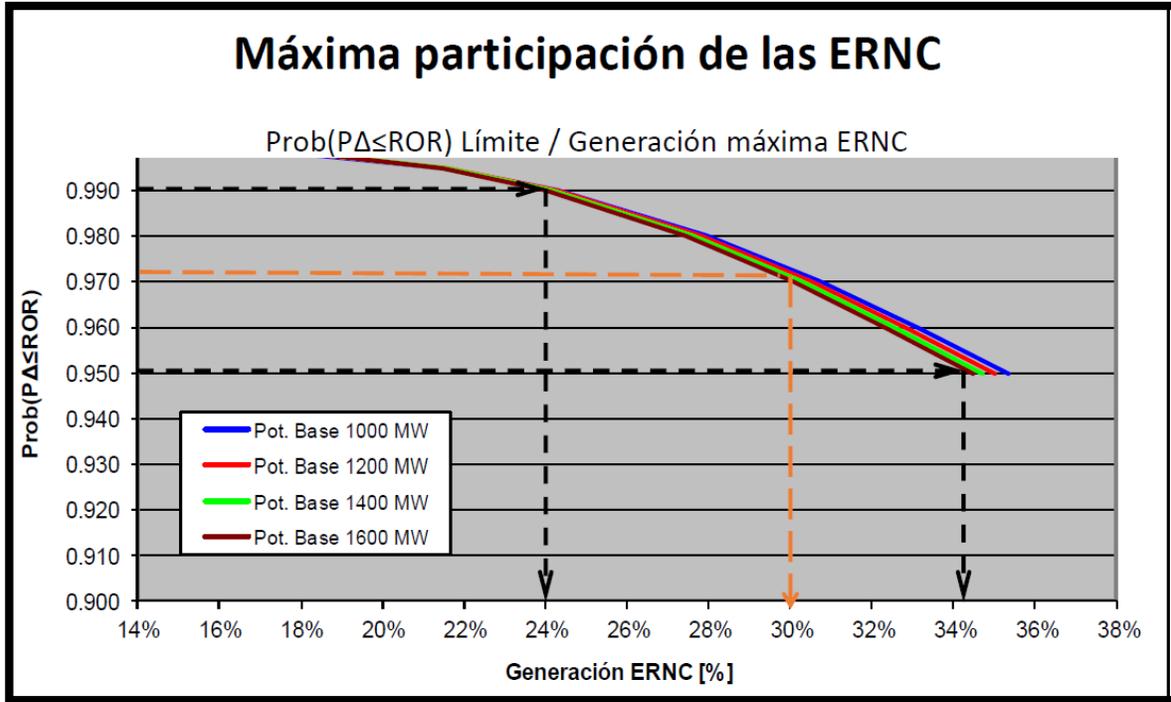
Reserva Rodante ROR.

En términos generales la reserva rodante son todos aquellos generadores que trabajan a una potencia inferior a la capacidad nominal y que se encuentran disponibles para compensar variaciones en la frecuencia general del sistema. En el caso de la energía proveniente de los sistemas fotovoltaicos no se posee dicha reserva extra, al contrario, la energía solar no es constante durante el día lo que hace necesario compensar sus fluctuaciones con la reserva rodante que puedan proporcionar otras centrales. La cantidad de demanda que se puede suplir por energía solar fotovoltaica se ve limitada por cuanta reserva rodante hay disponible, puesto que la disposición del recurso se limita a las horas diurnas y su inyección durante el día no es constante y en ocasiones puede ser impredecible debido a las condiciones climáticas, las fluctuaciones en la frecuencia se van agravadas en la medida más demanda sea cubierta por energía solar fotovoltaica y por consecuencia mayor será la reserva rodante será necesario.

En el año 2015 la UT (Unidad de Transacciones) ejecutó un estudio con el apoyo de la USAID que buscaba determinar qué tanta demanda se podría cubrir con energías renovables de tipo eólica y solar fotovoltaica en base al desempeño de la reserva rodante. En dicho estudio se hacen análisis explorando diferentes niveles de probabilidad de reserva suficiente, la USAID recomienda una probabilidad del 0.99 lo que permite una participación de energías renovables del 24% de la demanda total del país, Imagen 35. El equipo formado por la UT-CNE y SIGET sugiere tomar una probabilidad del 0.97, lo que hace posible incluir hasta un 30 % de la demanda con energías renovables no convencionales, (C. Najera), aun así, este último dato considera a todas las energías renovables no convencionales cuya irregularidad

necesite ser suplida por la red. Los datos planteados por el estudio evalúan el desempeño de la ROR para el 2016, 2018 y 2020 usando las proyecciones que en ese momento manejaba el CNE. (Tetra Tech ES, 2015)

IMAGEN 35. RESULTADOS DEL ESTUDIO REALIZADO POR LA USAID (TETRA TECH ES, 2015)

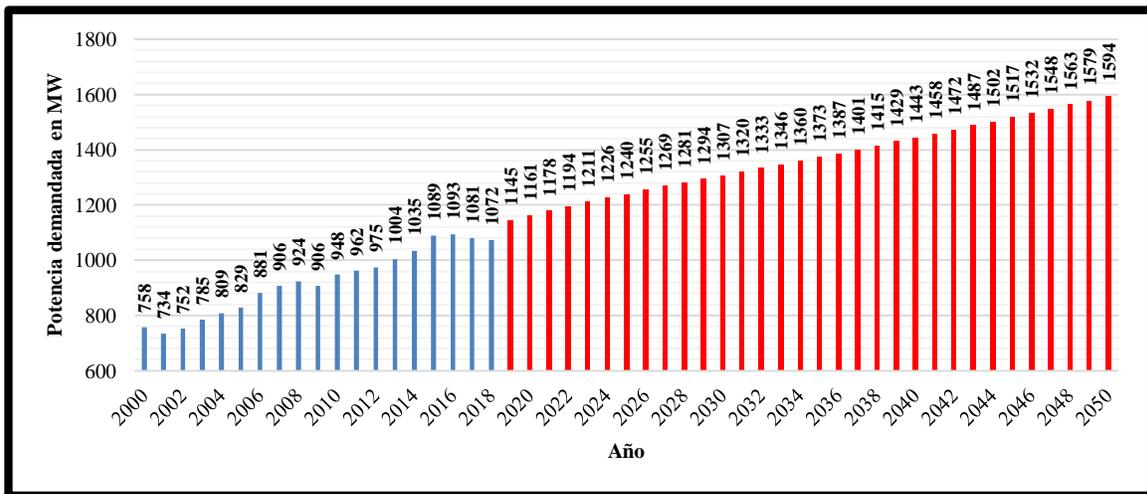


5.2.2. PROYECCIÓN FINAL DE RESIDUOS EN EL SALVADOR

De la información recopilada por las instituciones públicas se sabe cuánto es la potencia instalada con energía solar fotovoltaica, para el año 2019. Se tiene una proyección de cuanto será la demanda de potencia y es posible extrapolar estos datos usando la tendencia planteada por el CNE. Algo importante a destacar es que a pesar que la demanda del periodo del 2017 a mediados del 2019 ha presentado una disminución, puede deberse a las energías renovables aplicadas de manera local para el autoconsumo, información que no descarta la proyección al alza descrita por el CNE. El último dato de gran importancia para el planteamiento es que a pesar de que el CNE sugiere que la potencia instalada de solar fotovoltaica podría llegar a los 617 MW para el 2023, la reserva rodante podría no poder cubrir las fluctuaciones de frecuencia inherentes a la energía solar. Es importante embonar con la demanda de potencia proyectada para cada año, puesto que según el análisis ejecutado en el 2015 por parte de la USAID la ROR podría llegar a soportar un 30% de la demanda cubierta por energía renovable. Si bien es cierto la ROR puede ir aumentando durante los años siguientes es difícil de predecir y no hay estudios más actuales que indiquen que más porcentaje de la demanda puede ser cubierta por energías renovables no convencionales, por tanto, se trabajara con este último dato.

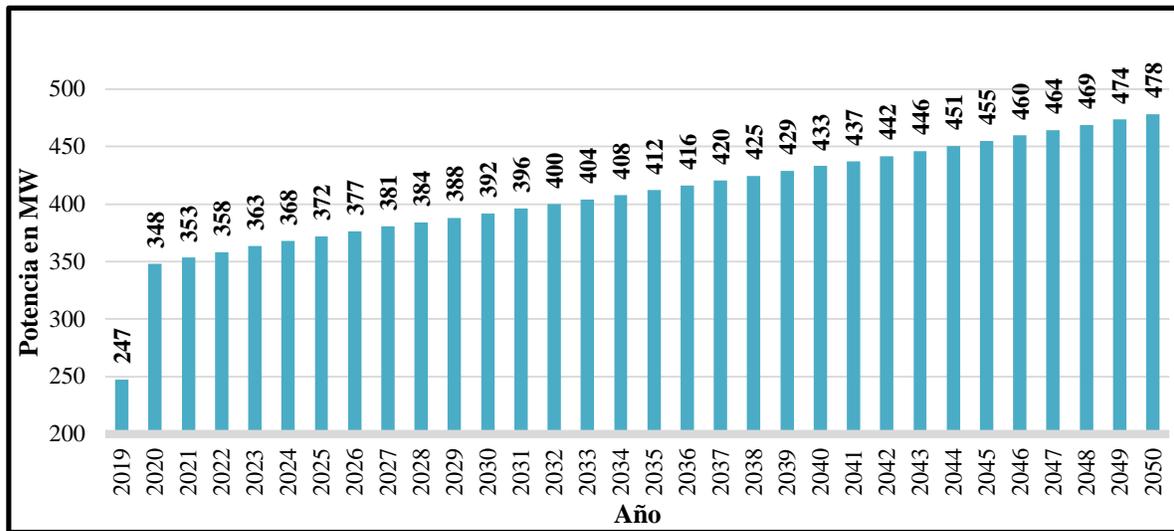
Siguiendo estas limitaciones se tiene que la evolución de la demanda en potencia para el año 2030 será de 1,307 MW, la demanda para el 2050 ascenderá hasta 1,594 MW. La Imagen 36 muestra a detalle el crecimiento anual a partir del 2019, este gráfico fue elaborado tomando como base la gráfica que se muestra en la Imagen 33 y es una proyección que se limita a seguir con la tendencia planteada en esta. En base a estos datos y considerando las limitaciones de la ROR, es posible obtener la capacidad instalada en energía solar fotovoltaica, que puede soportar el sistema eléctrico sin generar fluctuaciones en el servicio, la cual se tomara como dato base para realizar la proyección de la masa de módulos solares desechados para el periodo 2019 al 2050.

IMAGEN 36. PROYECCIÓN DE POTENCIA DEMANDADA HASTA 2050 (ELABORACIÓN PROPIA)



Tomando como ejemplo el año 2020, como se indica en la Imagen 36, la capacidad prevista es de 1161 MW, si tomamos como base que la ROR actual solo soporta 30% de MW en energía renovables y además asumimos que todo este porcentaje será asignado a solar fotovoltaica, la capacidad instalada para dicho año sería de 348 MW. Esta forma de aproximar como crecerá el parque fotovoltaico en El Salvador está basada plenamente en la información disponible para el 2019, se ignora como la ROR puede mejorar durante el tiempo, se asume que el 30% será cubierto netamente por solar fotovoltaica, lo que descarta otras fuentes renovables como el biogás y asume un factor de crecimiento de la potencia demandada total del 1%. Los resultados finales se muestran en la Imagen 37.

IMAGEN 37. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN SOLAR FOTOVOLTAICA (ELABORACIÓN PROPIA)

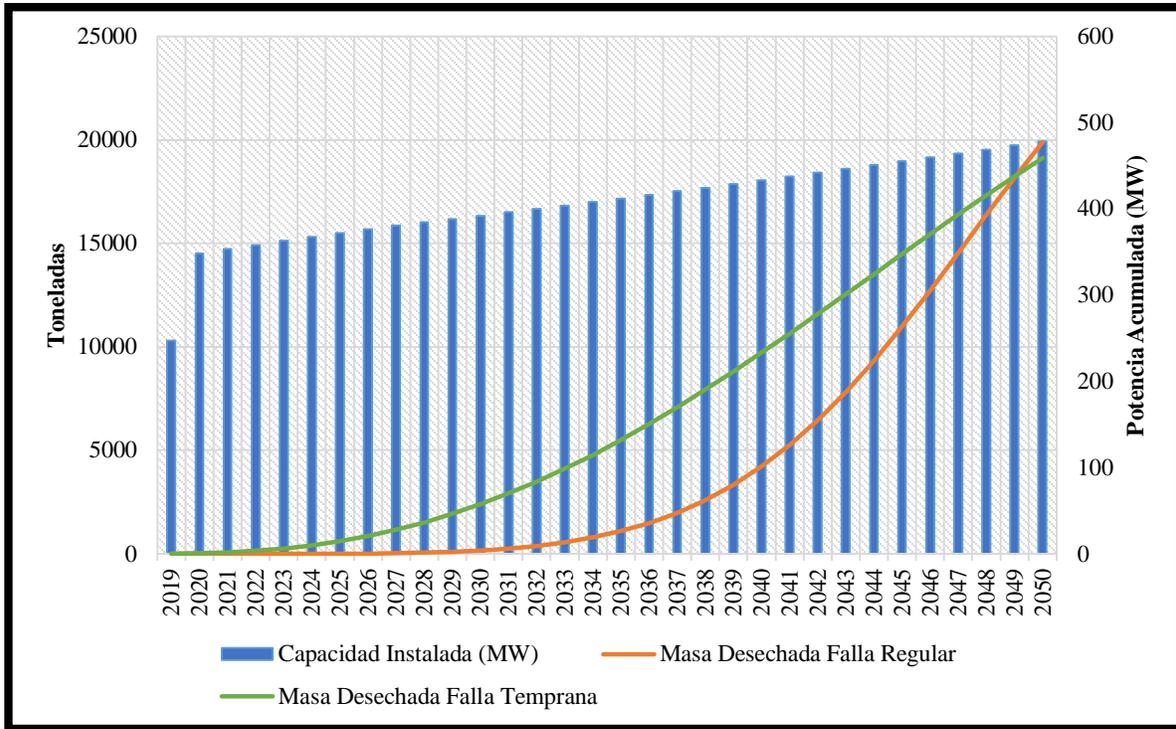


En base a los resultados, mostrados en la Imagen 37 es posible, a partir de la distribución de Weibull (5.1.1 Proyección de residuos de paneles solares.) y con los datos de la evolución de masa, plantear cuantas toneladas de módulo solar será descartada en un periodo de 30 años tomando como punto de partida el 2019, tanto para el análisis de falla regular como para el análisis de falla temprana.

Resultados de la Proyección de Residuos Según Método del IRENA.

En la Imagen 38 es posible apreciar la cantidad de masa desechada anualmente a partir del 2019 hasta el 2050, el detalle de los datos calculados para el escenario de falla regular y temprana se encuentra en Anexo 1 y Anexo 2 respectivamente. En el análisis de falla regular tenemos pocos residuos generados en el 2019 y su crecimiento es leve, en el 2030 se llegará a 165 T, para el 2040 la masa será de 4223 T desechadas y en el 2050 alcanza 19,904 T, puesto que buena parte de los paneles solares han llegado a su vida útil y la probabilidad de falla es muy elevada. En el caso del análisis de falla temprana plantean una salida de residuos más constante, ya para el 2025 se podría esperar tener cerca de 612 T de residuos provenientes exclusivamente de módulos solares, en el 2030 la cantidad asciende a 2391 T, en el 2040 se estaría generando 9717 T de residuos y para el 2050 se llegaría 19134 T, este último es menor que en el análisis anterior puesto que más módulos tienen una probabilidad más alta de fallar antes de cumplir su vida útil, es por eso que al sobrepasar los 30 años hay menos masa de módulos averiados.

IMAGEN 38. CRECIMIENTO DE CAPACIDAD INSTALADA Y MASA DESECHADA DE PÉNELES SOLARES (ELABORACIÓN PROPIA)



Las desventajas de este tipo de proyección es que se basa en la probabilidad de falla, la cual implica una incertidumbre inherente al método; asume que las instalaciones fotovoltaicas actuales no sufrirán procesos de actualización de tecnología con el paso del tiempo, se asume que la capacidad de la ROR se mantendrá constante con el tiempo, lo que limita que tanta energía solar pueda incorporarse a la matriz; el método se basa en proyecciones de la demanda del país que podrían resultar ser mayores o incluso menores con el devenir de los años. Lo que nos deja ver la Imagen 38 es que la cantidad de masa de residuos de módulos solares que se puede esperar en el futuro estará entre los resultados planteados por ambos tipos de análisis, donde antes de los 30 años el análisis de falla temprana representa el valor máximo y el escenario de falla regular representa el mínimo, después de los 30 años este comportamiento se invierte. Es posible que la masa desplazada año con año sea mayor a los límites establecidos en cada análisis si el incremento de instalación de paneles solares no se ve controlado o limitado por parte del Estado, esto puede ser debido a que futuros estudios arrojen resultados diferentes a la investigación hecha por la USAID en el 2015 sobre la ROR o simplemente veamos como las instalaciones residenciales y los sistemas autónomos con baterías se popularicen e impliquen un incremento mucho mayor al planteado; aun así para el año 2019 no se cuenta con información u otros estudios que corroboren estas últimas suposiciones.

Con el análisis realizado si se puede tener en claro que de los 247 MW instalados con tecnología solar fotovoltaica del año 2019, producirán una masa que rondará 13,699 T. Recordemos que, según el IRENA, la máxima probabilidad para la distribución de Weibull se alcanza a los 40 años y el peso esperado para paneles de tecnología de silicio es de aproximadamente 73 T/ MW.

Registros de importación

Es importante aclarar que inicialmente se tenía planeado para la tesis proyectar las cantidades de residuos en base a los registros de importación de paneles solares al país. El proceso a seguir es llenar la hoja de solicitud que otorga el oficial de información pública del Ministerio de Hacienda, encargado de facilitar y proporcionar los datos que personas naturales soliciten en conformidad con la ley, en esta hoja es necesario indicar primeramente los datos personales y luego escribir específicamente que es lo que se necesita, en el caso del estudio se centra en los paneles solares que han ingresado al país desde el 2016 hasta el 2019.

La parte complicada del proceso es buscar el número o código de partida exacto, es decir buscar como aduana clasifica a los paneles solares. Es necesario usar el SAC edición VI, en él se detallan los diferentes capítulos y secciones en los cuales se clasifica un producto que entrara al país. Los paneles solares son elementos electrónicos por lo que la búsqueda se hizo en el Capítulo 85 del SAC “MAQUINAS, APARATOS Y MATERIAL ELECTRICO, Y SUS PARTES; APARATOS DE GRABACION O REPRODUCCION DE SONIDO, APARATOS DE GRABACION O REPRODUCCION DE IMAGEN Y SONIDO EN TELEVISION, Y LAS PARTES Y ACCESORIOS DE ESTOS APARATOS”. Este capítulo a su vez se divide en diferentes secciones, para el objetivo del estudio la sección deseada es la 85.41: “DIODOS, TRANSISTORES Y DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES SIMILARES; DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES FOTOSENSIBLES, INCLUIDAS LAS CELULAS FOTOVOLTAICAS, AUNQUE ESTEN ENSAMBLADAS EN MODULOS O PANELES; DIODOS EMISORES DE LUZ (LED); CRISTALES PIEZOELECTRICOS MONTADOS”. Por último, dentro de esta sección se encuentra el código específico que es necesario para obtener datos, el número en cuestión es el 8541.40.00.00, el cual hace referencia a “Dispositivos semiconductores fotosensibles, incluidas las células fotovoltaicas, aunque estén ensambladas en módulos o paneles; diodos emisores de luz (LED)”.

Unas veces realizadas la solicitud formal se entra en un periodo de 10 días hábiles para recibir respuesta con la información necesitada. Se solicitó las cantidades ingresadas bajo el número o código de partida 8541.40.00.00. El problema radica en que el código donde son clasificados los paneles solares es muy general e incluye otros componentes semiconductores, lo que hace que la información conseguida no sea del todo acertada y sea imposible entrar en mayores detalles. Sería lo ideal que en el futuro Ministerio de Hacienda agregue un código en específico para los módulos solares, aunque no se haga diferencia de

su tecnología y capacidad, si podría arrojar una idea de la cantidad de masa ingresada por parte de este rubro. Los resultados facilitados por el oficial del Ministerio de Hacienda es la planteada en la Tabla 7, las unidades de las cantidades establecidas tampoco son detalladas, por lo que es difícil utilizar la información para proyectarla en el año 2050, sin mencionar que la cantidad es por célula solar y va mezclada con diferentes semiconductores fotosensibles.

TABLA 7. INFORMACIÓN OFICIAL PROPORCIONADA POR MINISTERIO DE HACIENDA

Año	Número de Partida	Descripción	CNTD
2016	85414000	Dispositivos semiconductores fotosensibles....	1,633,137.00
2017	85414000	Dispositivos semiconductores fotosensibles....	1,284,555.00
2018	85414000	Dispositivos semiconductores fotosensibles....	2,931,620.00
2019	85414000	Dispositivos semiconductores fotosensibles....	5,605,234.00

Tras la imposibilidad de utilizar la información disponible por aduana y el Ministerio de Hacienda, se utilizó el método descrito en el apartado anterior, puesto que arrojaría datos más comprensibles y cercanos a la realidad.

Capítulo 6 NORMATIVA

6.1. INTERNACIONAL

6.1.1. CONVENIO DE BASILEA Y WEEE DIRECTIVE

El Convenio de Basilea es un Tratado Internacional del cual El Salvador forma parte ya que en 1990 se firmó y por ende se encuentra adscrito como país participante, además de haber ratificado en 1991. (MARN, y otros, 2017)

Este convenio establece un mecanismo armonizado internacionalmente para controlar el movimiento de los desechos peligrosos y otros desechos, a través de las fronteras internacionales. En cumplimiento del convenio se puede autorizar la exportación de residuos y desechos peligrosos a países que formen parte del convenio, siempre y cuando cuenten con la tecnología y garantías de que los desechos serán manejados para prevenir contaminación ambiental y que estos no causaran daño a la salud o al medio ambiente. (MARN, y otros, 2017)

El Convenio de Basilea tiene una enmienda conocida como “Enmienda de Prohibición del Convenio de Basilea”, que fue ratificada por El Salvador el 07 de diciembre de 2015, en la cual se establece una salvaguarda para prevenir exportaciones de desechos peligrosos desde países desarrollados, hacia países en vías de desarrollo. (MARN, y otros, 2017)

El Convenio de Basilea forma parte de la Legislación Nacional, a través del Decreto Legislativo publicado en el Diario Oficial No. 115, Tomo No. 311, publicado en el Diario Oficial de fecha 24 de junio de 1991 y el Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos, Decreto No. 41, del 31 de mayo de 2000, publicado en el Diario Oficial No. 1001, Tomo No. 347, del 01 de junio de 2000. (MARN, y otros, 2017)

De acuerdo con el Convenio de Basilea, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, conocidos como RAEE, por sus siglas, son residuos peligrosos, por lo que su exportación requiere de trámites especiales y el país de destino debe poseer infraestructura y facilidades suficientes para el manejo apropiado y utilización de este tipo de residuos, tal y como se mencionó anteriormente. Por lo que previo a importar o exportar se requiere de la firma de autorizaciones de ambos países con lo cual se debe de cumplir con los requisitos establecidos por el MARN. (MARN, y otros, 2017)

A partir de lo planteado por el convenio de Basilea se vuelve necesario comprender como se clasifican los paneles solares. Alrededor del mundo la mayoría de módulos son a base de células de silicio y más del 90% de su masa está formada por vidrio, polímero y aluminio; a pesar de esto, se sabe que el reciclaje puede llegar a ser complicado por el mismo silicio y la presencia de plata, además de la presencia de pequeñas trazas estaño y plomo, estos últimos pueden alcanzar un 4% de la masa total. Otro ejemplo son los paneles de capa delgada, en el que el 98% del peso está compuesto por aluminio, vidrio y polímeros, los cuales entran en la

clasificación de “material no peligroso”, pero también contiene pequeñas cantidades de zinc y cobre, los cuales llegan al 2% de la masa del módulo, el cual se ve como un material potencialmente dañino al medio ambiente. Estos elementos pueden caer en una clasificación especial y depende mucho de la jurisdicción y la normativa aplicada en cada región. (MARN, y otros, 2017)

En muchas regiones los residuos solares caen dentro de una clasificación general, a excepción de la Unión Europea, donde son directamente clasificados como desperdicio electrónico según la directiva WEEE, esta última se encarga de velar por el equilibrio entre las ventajas e inconvenientes de las diferentes tecnologías y promueve el reciclaje, recuperación y reutilización de los residuos provenientes de componentes y aparatos electrónicos. Algo importante es que la directiva WEEE plantea al productor como responsable de la disposición final de los paneles solares independientemente de la ubicación de sus fábricas, la implicación final radica en que una empresa productora se ve obligada a velar por el manejo de los módulos en su etapa final si desea entrar en el mercado europeo. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

La Directiva WEEE entro en vigor en febrero del año 2003 para aparatos electrónicos en general y fue a partir de la revisión de agosto 2012 donde se añadieron los detalles sobre el manejo de paneles solares al final de su vida útil, para este momento los 28 estados que formaban la Unión Europea eran responsables el régimen de recogida y tratamiento, utilizando el principio de responsabilidad ampliada del productor, donde este último debe asumir los costes de recogida, tratamiento y control; haciéndolos que deban cumplir un requisito mínimo de responsabilidades. Por ejemplo, los productores son responsables a través de una garantía financiera de cubrir los gastos de recolección y reciclado de los productos de uso residencial, a su vez se vuelven responsables de establecer puntos de recolección e instalaciones de reciclaje correctamente equipadas; estos deben ceñirse a un esquema de cumplimiento. Otra de las responsabilidades que los productores adquieren es la de responsabilidad de reportar mensualmente o de manera anual la cantidad de paneles fotovoltaicos vendidos, retirados y enviados a tratamiento de reciclaje; además deben reportar las cantidades de materiales recuperadas del tratamiento y manejo de residuos. Los productores también son responsables de distribuir información por medio del etiquetado de los módulos solares, de acuerdo a la directiva WEEE, así como de informar a los compradores que deben separar los paneles solares del resto de residuos generales y de la debida entrega de estos en los centros destinados para su recolección. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

6.1.2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En el 2015, las Naciones Unidas y sus Estados Miembros adoptaron una Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con la cual se identificaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 Metas, para acabar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos de en lo que resta para alcanzar el 2030. El incremento de residuos electrónicos y la inadecuada y carente seguridad en su tratamiento, así como la disposición

final en vertederos o su incineración, genera problemas importantes en el medio ambiente y la salud de las personas y, por ende, para el cumplimiento de los ODS.

Para el cumplimiento de estos objetivos, en especial los relativos al medio ambiente y a la salud; es necesario el contar con datos y el conocimiento más profundo de los residuos electrónicos. Lo cual a su vez contribuirá a resolver el problema del empleo y al crecimiento económico, ya que una buena gestión puede dar lugar a nuevos empleos y a impulsar el emprendimiento. (Baldé, Forti, Kuehr, & Stegmann, 2017)

De acuerdo con el informe “Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos 2017”, elaborado por la Universidad de las Naciones Unidas, la Unión Internacional de Telecomunicaciones y la Asociación Internacional de Residuos Sólidos, el tratamiento inadecuado de los residuos electrónicos puede generar graves problemas para la salud, dado su contenido de componentes peligrosos, los cuales contaminan el aire, el agua y el suelo, y pueden representar un riesgo para la salud de las personas. De ahí la importancia en que los procesos de desarmado, el contar con instalaciones adecuadas y con un personal cualificado son importantes para evitar que éstos se conviertan en una amenaza para las personas y el medio ambiente. (Baldé, Forti, Kuehr, & Stegmann, 2017)

6.1.3. OPCIONES PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS

INVOLUCRADOS O *STAKEHOLDERS*

El reciclaje o gestión de los residuos generados al final de la vida útil de los proyectos solares fotovoltaicos, está compuesto por diversos involucrados o, *Stakeholders*, que van desde la generación de los residuos, su recolección, transporte, tratamiento y disposición final; y estos son:

La Sociedad: La gestión del final de la vida útil de los paneles solares, debe estar apoyada por la sociedad con el soporte de organizaciones gubernamentales controlando y manejando operaciones, financiamiento e impuestos. Lo cual puede producir ingresos a municipalidades y eliminar los costos fijos de la construcción de una infraestructura de recolección, al mismo tiempo que proporcionaría beneficios de economía de escala. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Consumidores: El consumidor que produce los residuos de paneles, luego de haber sido utilizados, es responsable de la gestión de final al final de su vida útil, incluyendo el tratamiento y la eliminación. Sin embargo, el consumidor siempre procurará minimizar sus costes, lo que puede provocar un efecto negativo durante la recolección y el tratamiento de los residuos. Esto siempre y cuando el productor no se encuentre involucrado, lo cual puede provocar menos motivación para producir productos reciclables, amigables al medio ambiente. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Productores: La gestión del final de la vida útil de los paneles solares debe estar basada en el principio de responsabilidad extendida del productor. Este principio coloca a los

productores como responsable tanto físicamente como financieramente por el impacto al medio ambiente de sus productos. Sin embargo, una gestión adecuada proporciona incentivos para el desarrollo de productos más amigables al medio ambiente. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

ESQUEMAS DE FINANCIAMIENTO

Es importante destacar que la directiva WEEE establece las transacciones entre negocio y consumidor final particular y la transacción de negocio a negocio, distinción que es importante puesto que en el último caso el cliente tiene la facultad suficiente para manejar el reciclaje de los paneles solares. La directiva establece dos esquemas de financiamiento, uno implica el pre-financiamiento individual y esquemas colectivos de responsabilidad; y el otro implica contratos entre productor y consumidor, haciendo uso de las interacciones mencionadas anteriormente. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Alemania: La gestión alemana de los residuos electrónicos se regula a través del Registro Nacional de Residuos de Equipo Eléctrico (Stiftung Elektro-Altgeräte Register o Stiftung EAR). Esta última se encarga de registrar a los productores de residuos electrónicos y coordina la provisión de contenedores y recogida en toda Alemania, ahora bien, la responsabilidad de las tareas operativas como la recogida, clasificación, desmantelamiento, reciclado o eliminación de residuos electrónicos recae en los productores. En Alemania se establece una categoría de recolección separada para los paneles solares, los paneles son devueltos directamente al productor o son llevados a sistemas de recolección y reciclaje. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Reino Unido: para el 2014 iniciaron la implementación de la directiva WEEE, previo a esto su sistema consistía en una participación voluntaria de productores y sistemas de recogida y reciclaje propiedad de los productores. Las medidas aplicadas consisten en hacer al productor fotovoltaico el responsable de financiar la recogida de paneles fotovoltaicos en hogares, por ejemplo, un 10% (en peso) de paneles nuevos en el mercado británico en un año dado, paga la recolección y el tratamiento del 10% de paneles viejos recogidos en el año siguiente. Los casos de transacciones entre dos privadas o entre productor y una entidad catalogada como negocio, implica que el primero se vea encargado de reciclar y recolectar los paneles solares etiquetados como tal y de reemplazar inmediatamente aquellos que no lo estén; es importante notar que la directiva WEEE permite establecer acuerdos entre este tipo de relación productor consumidor, puesto que se considera que ambos pueden llevar con la responsabilidad. En el Reino Unido se hace la separación de distribuidor para el cual hay un esquema propio de cumplimiento y participación de la recolección y devolución. Debido a que la directiva exige el tratamiento de primer nivel de paneles fotovoltaicos, se permite exportar los desechos a otros estados miembros de la UE que cuenten con instalaciones que cumplan los requisitos. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Japón: como tal no posee una reglamentación específica para módulos solares y son tratados a través del marco regulatorio general para la gestión de residuos: la Ley de Gestión de Residuos y Limpieza Pública. La ley define los residuos, las responsabilidades de generadores y manipuladores de residuos industriales, la gestión de los residuos industriales, incluida la eliminación de vertederos, etc. Para el 2013 Japón valoraba la necesidad del manejo específico de los residuos provenientes del final de la vida útil de instalaciones solares fotovoltaicas e instalaciones eólicas, en el 2015 se publicó un informe con la idea de promover un plan de recogida, reciclado y tratamiento, así como directrices para el desmantelamiento, transporte y tratamiento. En la actualidad los paneles solares son retirados de los edificios o lugares de instalación y transportados a procesadores intermedios para tratamiento de residuos, donde los componentes se separan tanto como sea posible. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Estados Unidos: es el mismo caso que Japón donde no existe una ley específica para módulos fotovoltaicos y estos son eliminados en consonancia con la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos, siendo esta el marco legal para la gestión de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos. Al final de la vida útil de un panel solar, este no entra en la categoría de residuo peligroso, pero si se debe evaluar los efectos que tiene en el medio ambiente a largo plazo, principalmente llegar a conocer los niveles de lixiviación que una muestra pueda generar. En general en Estado Unidos se promueve la recolección voluntaria de los residuos de paneles solares, no hay un plan de recolección y reciclaje como tal. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

China: para finales del 2015 se coronaban como el mercado más grande de energía solar fotovoltaica del mundo, pese a esto no existe una regulación específica para el final de la vida útil de los paneles solares. En 2011 entró en vigor la reglamentación para el reciclaje de productos eléctricos y electrónicos, la cual requiere que los residuos se recojan y sean llevados a centros de procesamiento y reciclado centralizado. En este caso los productores pueden llevar a cabo la tarea de recolección o confiar en los vendedores, además pueden hacerse cargo de esta tarea los mismos centros de reciclaje; de momento los paneles solares no entran dentro de la clasificación de producto eléctrico u electrónico, lo que puede deberse a que no manejan un volumen tan alto de desechos. (IRENA; IEA-PVPS, 2016)

Latinoamérica: al igual que en los últimos dos ejemplos los países latinos no cuentan con una ley específica para la recolección y reciclaje de paneles solares una vez estos alcanzan el final de su vida útil. Algo a notar es que no todos los países de Latinoamérica tienen un sistema o una reglamentación para la manipulación de residuos provenientes de aparatos eléctricos y electrónicos. Costa Rica, Colombia y Perú ya tienen legislación para el manejo del desperdicio electrónico, pero no hay mayor consideración para una normativa específica de sistemas o paneles fotovoltaicos. (UNU-IAS, 2015)

6.2. NACIONAL

6.2.1. ESIA Y PERMISO AMBIENTAL PARA LA EJECUCIÓN DE PROYECTOS FOTOVOLTAICOS.

El ente encargado de realizar la evaluación ambiental de los proyectos es el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). El Permiso Ambiental de Construcción requiere de la obtención de constancias, dictámenes técnicos o resoluciones de otras instituciones, dependiendo de las características propias de cada proyecto, por lo que es necesario que se incorpore información detallada del proyecto, con conocimiento de las instituciones adicionales a las cuales hay que acudir previamente a la presentación de la documentación en el MARN.

De acuerdo a la Categorización de Actividades, Obras o Proyectos 2017, el cual desarrolla la categorización de las actividades, obras o proyectos que, conforme al Art. 22 de la Ley del Medio Ambiente, requieren de Permiso Ambiental para su realización o funcionamiento, ampliación, rehabilitación o reconversión.

En dicho documento se establece una clasificación de acuerdo al nivel de impacto al medio ambiente, siendo los siguientes:

- Actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial bajo (PIAB),
- Actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial leve (PIAL),
- Actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial moderado o alto (PIAMA)

IMAGEN 39. ESTRUCTURA DE LA CATEGORIZACIÓN (MARN, 2017)



Evaluación global de los criterios de categorización en función del impacto ambiental potencial esperado.

Categoría de actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial bajo (PIAB)

En esta categoría se establecen las actividades, obras o proyectos cuyos impactos ambientales potenciales a ser generados en los componentes del medio receptor (suelo, aire y agua) y a la salud de la población o bienestar humano, se prevé serán **BAJOS**, es decir, aquellos cuyos

impactos potenciales en el medio, sean simples e inmediatos, por tanto “No Requieren Presentar Documentación Ambiental”. Por lo que se categorizará de acuerdo a lo establecido en el artículo 22 del Reglamento General de la Ley del Medio Ambiente. (MARN, 2017)

Particularmente, en el caso de los proyectos de generación solar, se tiene que los proyectos que pueden ser categorizados como PIAB, son los siguientes:

- Instalación de proyectos de generación en techos existentes con autorización ambiental.
- Capacidad de planta de generación por fuente solar, instalada en suelo (Hasta 0.25 MW).
- Capacidad total de almacenamiento (Ah) en proyectos que incluyan acumuladores (Hasta 1,000Ah). (MARN, 2017)

En este caso, se emite una respuesta por medio de una nota con la cual se hace constar que el proyecto no requiere de la presentación de documentación ambiental.

Categoría de actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial leve (PIAL)

En esta categoría se establecen aquellas actividades, obras o proyectos que generen impactos ambientales potenciales **LEVES**, es decir, aquellos que por su relación causa-efecto, interacción de acciones, su persistencia y capacidad de recuperación del medio receptor, se prevé no deterioraran el medio ambiente ni pondrán en peligro la salud humana y la calidad de vida de la población. Por lo que se categorizará de acuerdo a lo establecido en el artículo 22 del Reglamento General de la Ley del Medio Ambiente

Para el caso de los proyectos de generación solar, se tiene que los proyectos que pueden ser categorizados como PIAL, son los siguientes:

- Instalación de proyectos de generación en techos existentes con autorización ambiental.
- Capacidad de planta de generación por fuente solar, instalada en suelo (Hasta 5 MW).
- Capacidad total de almacenamiento (Ah) en proyectos que incluyan acumuladores (Más de 1,000Ah). (MARN, 2017)

Para la aprobación de los proyectos en esta categoría, el MARN emite un Dictamen Técnico y Resolución de No Requerimiento de Elaboración de Estudio de Impacto Ambiental, emitiendo también condiciones que serán de cumplimiento obligatorio por parte del Titular del proyecto y que podrán ser auditadas posteriormente.

Grupo de Actividades, Obras o Proyectos con Potencial Impacto Ambiental Moderado o Alto (PIAMA)

En esta Categoría se establecen aquellas actividades, obras o proyectos que generen impactos ambientales potenciales MODERADOS O ALTOS, es decir, aquellos cuyos impactos potenciales en el medio, son de gran extensión, permanentes, irreversibles, acumulativos, sinérgicos, debiendo determinar respectivas medidas ambientales que los prevengan, atenúen y compensen según sea el caso. Por lo que se categorizará de acuerdo a lo establecido en el artículo 22 del Reglamento General de la Ley del Medio Ambiente.

Los proyectos de generación solar, que aplican para esta categoría, son los siguientes:

- Instalación de proyectos de generación en techos existentes con autorización ambiental.
- Capacidad de planta de generación por fuente solar, instalada en suelo (Más 5 MW).
- Capacidad total de almacenamiento (Ah) en proyectos que incluyan acumuladores (Más de 1,000Ah). (MARN, 2017)

Los proyectos categorizados como PIAMA, requieren de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, por lo cual se emiten los Términos de Referencia para su elaboración. Inicialmente se debe iniciar un proceso de Consulta Pública, para obtener las observaciones o discusiones emitidas por la población, referente a la ejecución del proyecto. Luego durante la evaluación ambiental se establecen Medidas Ambientales, las cuales deben ser afianzadas a través de una Fianza de Cumplimiento Ambiental, previo a la obtención del Permiso Ambiental. El valor de dicha fianza es equivalente a los costos totales de las obras físicas e inversiones que se requieran para cumplir con los planes de manejo y adecuación ambiental y tiene una duración equivalente a la realización de las mismas. Posteriormente el MARN emite el respectivo Dictamen Técnico y Resolución, con lo cual se establecen las condiciones con las cuales se realizará la liberación de la fianza, una vez se cumplan las obras e inversiones, así como los instrumentos con los cuales se les dará seguimiento, control y auditoría ambiental a lo largo de la vida del proyecto

6.2.2. ETAPAS PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE).

Como parte de la legislación nacional, existe una Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en El Salvador, emitido por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en la cual se establecen las Etapas para la Gestión de los RAEE, tal y como se detalla a continuación.

- Etapa I. Recepción y Almacenamiento Temporal.
- Etapa II. Acopio o Almacenamiento de RAEE.
- Etapa III. Desmontaje y Aprovechamiento.

- Etapa IV. Procedimiento de Exportación de RAEE de Acuerdo al Convenio de Basilea. (MARN, y otros, 2017)

6.2.3. PROPUESTA DE MEJORA

- En cuanto a la legislación ambiental en nuestro país, si bien es cierto que los proyectos de gran envergadura y que pasan por el proceso de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, implementan medidas ambientales para su ejecución, debido al período de vida de los proyectos, no se cuenta con un procedimiento para el manejo de los residuos generados durante la vida del proyecto. Razón por la cual es necesario el incorporar medidas para la reutilización o reuso de los diferentes residuos que se generen debido a las causas que ya se mencionaron en el apartado 4.2, 4.3 y 4.4 del presente.
- Extendiendo el pensamiento anterior se vuelve necesario que proyectos de gran escala se vean mejor regulados en el aspecto de disposición final. Es necesario que cada proyecto establezca un periodo aproximado de vida y un plan de compromiso, en el que la empresa del proyecto y la empresa que provee los módulos solares lidien con la responsabilidad de la disposición final de los sistemas que alcancen su vida útil. Es necesario pues aplicar la idea de la responsabilidad extendida y compartida entre la empresa que se beneficiará del uso de paneles solares y el distribuidor o instalador de los mismos de tal forma que establezcan el mecanismo de y procedimiento para la sustitución de un módulo y el destino final que se le dará.
- Es necesario implementar medidas que contribuyan al desarrollo de una economía en torno al reciclaje de residuos electrónicos, en especial residuos provenientes de proyectos solares fotovoltaicos, lo cual a su vez podría contribuir a la generación de fuentes de ingreso para personas de escasos recursos. Para esto, es necesario la incorporación de plantas de gestión de reciclaje locales, con las cuales se proporcione un manejo adecuado de este tipo de residuos.
- Si bien es cierto existe una guía para la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en el país, esta no incorpora específicamente a los residuos de los proyectos solares fotovoltaicos, los cuales, como ya se analizó en el Capítulo 5, tendrán un significativo aporte de residuos cuando éstos finalicen su vida útil. Por lo que es necesario el incorporar un apartado en el cual se incluya este tipo de residuos.

Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Se espera que para el año 2050 El Salvador produzca entre 19,000 y 20,000 toneladas de residuos provenientes únicamente de paneles solares. Esta estimación se basa en las limitaciones que posee la matriz energética actual. Es importante notar que la cantidad de material que puede ser acumulado es notable y puede llegar a perjudicar a largo plazo al medio ambiente y la población en general. Además, es claro que el reciclaje de componentes supone una ganancia que puede ser lo suficientemente atractiva para que las empresas responsables de los proyectos puedan concebir sistemas de recolección para ser llevados a un posterior reciclaje.
- Siguiendo las convenciones del convenio de Basilea y la responsabilidad extendida planteada por la directiva WEEE, se vuelve necesario que las empresas dedicadas a la ejecución de proyectos solares fotovoltaicos en el país, se vuelvan responsables, junto con los proveedores o directamente con el productor, del correcto descarte de los residuos provenientes de las instalaciones, ya sea durante la vida útil del proyecto o al final de esta misma. A nivel residencial se vuelve necesario que las empresas encargadas de distribuir una marca de paneles, tenga acuerdos con el fabricante que permita distribuir responsabilidades, la primera debería encargarse de la recolección y envío a instalaciones acreditadas por el segundo, para el posterior reusó de elementos y componentes extraídos del reciclaje.
- De igual forma como a nivel nacional e internacional, se han implementado exitosamente políticas para promover el crecimiento de las energías renovables, y más específicamente el crecimiento de la energía solar fotovoltaica, se deben de implementar políticas nacionales que apoyen e incentiven el surgimiento de proyectos para el reciclaje de los distintos componentes de los proyectos solares fotovoltaicos.
- Es inminente que los proyectos solares fotovoltaicos experimentarán un gran crecimiento en los años venideros y nuestro país no será la excepción, por lo que las políticas a implementar en el futuro deberán incentivar el surgimiento de una industria dedicada al reciclaje de las instalaciones solares fotovoltaicas, lo cual producirá a su vez crecimiento y valor económico.
- Existen numerosas experiencias en otros países en cuanto a la implementación de políticas para el reciclaje de los residuos solares fotovoltaicos, sin embargo, algunos de ellos no han tenido los resultados esperados, por lo que es necesario que la implementación de una política para el reciclaje de productos solares fotovoltaicos

debe estar bien adaptada a las condiciones propias de cada país, así como el dejar claro los roles y responsabilidades de cada una de las partes involucradas.

7.2. RECOMENDACIONES

- Realizar una actualización de la información y recopilación de datos para hacer una mejor estimación de la generación de residuos.
- Es necesario mejorar la clasificación aduanal de los diferentes componentes de una instalación solar fotovoltaica. La experiencia adquirida a la hora de buscar información en las oficinas aduanales es que los capítulos en los cuales se incluyen elementos como paneles solares e inversores es muy general y dificulta obtener datos acertados de la cantidad de componentes de este tipo ingresados dentro del país.
- Es necesario realizar un estudio más actual sobre la reserva rodante del país y el comportamiento de la red eléctrica, ante el crecimiento de la implementación de energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica, puesto que esta es la de mayor expansión en la matriz. Debido a que el último estudio de la ROR se hizo en el año 2015, cuando esta tecnología no se encontraba tan expandida. Este nuevo estudio permitiría actualizar la proyección calculada en la presente investigación.
- Con base al punto anterior, es necesario comenzar a realizar una medición de los residuos generados anualmente por instalaciones de mayor tamaño, con lo cual se pueda validar o corroborar los resultados obtenidos a través de este trabajo.

REFERENCIAS

- Baldé, C., Forti, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *ITU*. Obtenido de Unión Internacional de Telecomunicaciones: <https://www.itu.int/search#?q=Observatorio%20mundial%20de%20los%20residuos%20electr%C3%B3nicos%202017&fl=0&ex=false&target=All>
- Chaaban, M. A. (2018). *PennState*. Obtenido de <https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/911>
- CNE. (2013). *Energías Renovables CNE*. Obtenido de http://energiasrenovables.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=37&Itemid=21
- CNE. (2018). Plan Indicativo de la Expansión de la Generación Eléctrica de El Salvador 2019-2028. San Salvador, El Salvador. Obtenido de <http://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2018/03/Plan-indicativo-de-la-generaci%C3%B3n-de-la-expansi%C3%B3n-2018-2035.docx.pdf>
- CNE. (Junio de 2019). *CNE*. Obtenido de Consejo Nacional de Energía: <https://www.cne.gob.sv/decima-edicion-revista-el-salvador-ahorra-energia/>
- Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., Wild-Scholten, M., & Zhang, J. (Enero de 2015). *Iea-pvps*. Obtenido de <http://iea-pvps.org/index.php?id=315>
- Fthenakis, V., & Kim, H. C. (23 de Febrero de 2010). *Semanticscholar*. Obtenido de Elsevier: <https://pdfs.semanticscholar.org/1891/62ebb29561bd28dacc5c1898a168441754d5.pdf>
- IRENA. (2019). *IRENA*. Obtenido de International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- IRENA; IEA-PVPS. (Junio de 2016). *IRENA*. Obtenido de International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., . . . Iseghem, M. V. (05 de Marzo de 2014). *IEA-pvps*. Obtenido de <http://iea-pvps.org/index.php?id=275>
- Louwen, A., G.J.H.M. van Sark, W., Faaij, A. P., & Schropp, R. E. (6 de Diciembre de 2016). *Nature Communications*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/ncomms13728>

MARN. (Julio de 2017). *MARN*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/274>

MARN, Monge Guadrón, C., Meléndez Ávalos, C., Jerez Mena, G., Flamenco Córdova, I., Flamenco Castillo, J., . . . Orellana Osorto, O. (Noviembre de 2017). *MARN*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://cidoc.marn.gob.sv/documentos/guia-tecnica-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-de-aparatos-electricos-y-electronicos-en-el-salvador/>

SIGET. (2018). *SIGET*. Obtenido de Super Intendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones: <https://www.siget.gob.sv/estadisticas/>

SIGET. (31 de Julio de 2019). *SIGET*. Obtenido de Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones: <https://www.siget.gob.sv/estadisticas/>

Tetra Tech ES. (Junio de 2015). *CNE*. Obtenido de Consejo Nacional de Energía: <https://www.cne.gob.sv/servicio/descarga-de-documentos/>

UNU-IAS. (Noviembre de 2015). *GSMA Latinoamerica*. Obtenido de <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-spa.pdf>

**ANEXO 1 MASA DESECHADA AÑO CON AÑO ESCENARIO DE FALLA REGULAR
(TONELADAS)**

Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2024	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2025	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2026	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2027	28	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2028	49	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2029	82	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2030	130	33	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2031	200	52	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2032	298	80	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2033	430	119	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2034	605	172	6	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2035	833	242	8	5	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2036	1123	333	12	8	6	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2037	1486	448	16	11	8	5	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0
2038	1932	593	22	15	11	7	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0
2039	2471	772	29	20	16	10	6	5	3	2	1	1	0	0	0	0
2040	3110	987	38	27	21	14	9	7	4	2	2	1	1	0	0	0
2041	3854	1242	49	35	28	18	12	9	6	4	3	2	1	1	0	0
2042	4705	1539	61	45	37	24	17	13	9	5	4	2	2	1	1	0
2043	5659	1879	76	57	47	32	22	18	12	7	5	4	2	2	1	1
2044	6707	2260	93	70	59	40	29	23	16	10	8	5	4	2	2	1
2045	7835	2679	112	86	73	51	37	30	21	14	10	8	5	4	2	2
2046	9018	3129	133	103	89	63	47	39	28	18	14	10	7	5	4	2
2047	10230	3602	155	122	107	77	58	49	35	23	19	14	10	7	5	4
2048	11438	4086	178	143	127	93	70	61	45	30	24	19	14	10	7	5
2049	12606	4568	202	164	148	110	85	74	55	37	31	24	18	14	10	7
2050	13699	5034	226	186	171	128	100	89	68	46	39	31	24	18	14	10

CONTINUACIÓN

Año	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	Masa total (t)
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
2026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
2027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34
2028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
2029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102
2030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	165
2031	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	256
2032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	383
2033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	558
2034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	791
2035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1097
2036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1489
2037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1983
2038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2593
2039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3336
2040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4223
2041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5264
2042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6465
2043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7823
2044	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9331
2045	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10970
2046	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12713
2047	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14524
2048	4	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16358
2049	5	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18168
2050	7	5	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19905

**ANEXO 2 MASA DESECHADA AÑO CON AÑO ESCENARIO DE FALLA TEMPRANA
(TONELADAS)**

Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
2019	3.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	21.16	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2021	58.08	8.45	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2022	118.78	23.20	0.42	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2023	206.67	47.44	1.15	0.39	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2024	324.51	82.54	2.35	1.06	0.40	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2025	474.54	129.60	4.09	2.16	1.10	0.35	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2026	658.52	189.52	6.41	3.76	2.25	0.95	0.32	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2027	877.72	262.99	9.38	5.91	3.92	1.95	0.87	0.33	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2028	1132.95	350.53	13.02	8.64	6.15	3.38	1.78	0.91	0.30	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2029	1424.54	452.46	17.35	12.00	8.99	5.31	3.09	1.87	0.83	0.25	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2030	1752.37	568.91	22.39	15.99	12.48	7.77	4.86	3.25	1.70	0.70	0.27	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
2031	2115.87	699.84	28.16	20.64	16.64	10.78	7.10	5.10	2.97	1.43	0.73	0.26	0.05	0.00	0.00	0.00
2032	2514.00	845.01	34.64	25.95	21.47	14.37	9.86	7.45	4.66	2.49	1.50	0.72	0.26	0.05	0.00	0.00
2033	2945.29	1004.01	41.82	31.92	27.00	18.55	13.14	10.34	6.81	3.91	2.60	1.48	0.72	0.26	0.05	0.00
2034	3407.85	1176.25	49.69	38.55	33.21	23.33	16.96	13.78	9.45	5.72	4.09	2.57	1.46	0.71	0.25	0.04
2035	3899.41	1360.98	58.22	45.80	40.10	28.70	21.32	17.79	12.60	7.93	5.98	4.04	2.55	1.45	0.70	0.25
2036	4417.32	1557.29	67.36	53.65	47.65	34.65	26.23	22.37	16.26	10.57	8.29	5.91	4.00	2.52	1.43	0.69
2037	4958.63	1764.13	77.08	62.08	55.82	41.17	31.67	27.52	20.44	13.65	11.05	8.20	5.84	3.95	2.49	1.42
2038	5520.09	1980.31	87.32	71.04	64.59	48.23	37.63	33.22	25.15	17.16	14.27	10.93	8.11	5.78	3.91	2.46
2039	6098.24	2204.54	98.01	80.47	73.91	55.81	44.08	39.48	30.37	21.11	17.94	14.11	10.81	8.02	5.72	3.87
2040	6689.43	2435.43	109.11	90.33	83.72	63.86	51.00	46.25	36.08	25.49	22.06	17.74	13.95	10.69	7.93	5.65
2041	7289.89	2671.53	120.54	100.56	93.98	72.34	58.36	53.51	42.27	30.28	26.64	21.82	17.54	13.80	10.57	7.85
2042	7895.79	2911.33	132.23	111.09	104.63	81.20	66.11	61.23	48.91	35.48	31.65	26.35	21.58	17.35	13.65	10.46
2043	8503.31	3153.31	144.10	121.86	115.58	90.40	74.21	69.36	55.96	41.05	37.08	31.31	26.06	21.35	17.16	13.50
2044	9108.66	3395.93	156.07	132.80	126.79	99.87	82.62	77.86	63.39	46.97	42.91	36.68	30.96	25.77	21.11	16.97
2045	9708.18	3637.69	168.08	143.84	138.17	109.55	91.27	86.68	71.16	53.21	49.10	42.44	36.27	30.62	25.49	20.88
2046	10298.36	3877.12	180.05	154.91	149.65	119.38	100.12	95.76	79.22	59.73	55.62	48.56	41.97	35.88	30.29	25.21
2047	10875.92	4112.82	191.90	165.93	161.17	129.30	109.11	105.04	87.52	66.49	62.44	55.01	48.03	41.51	35.48	29.95
2048	11437.80	4343.47	203.56	176.86	172.64	139.25	118.17	114.47	96.00	73.46	69.50	61.75	54.40	47.50	41.05	35.09
2049	11981.28	4567.87	214.98	187.61	184.00	149.16	127.27	123.98	104.62	80.58	76.78	68.74	61.07	53.81	46.98	40.60
2050	12503.93	4784.92	226.09	198.13	195.19	158.98	136.33	133.52	113.31	87.81	84.23	75.94	67.99	60.40	53.21	46.46

CONTINUACIÓN

Año	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	Masa total (t)
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.76
2020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.66
2021	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.61
2022	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	142.47
2023	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	255.71
2024	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	410.91
2025	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	611.90
2026	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	861.80
2027	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1163.13
2028	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1517.72
2029	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1926.75
2030	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2390.74
2031	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2909.56
2032	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3482.42
2033	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4107.89
2034	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4783.91
2035	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5507.85
2036	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6276.49
2037	0.68	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7086.11
2038	1.40	0.68	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7932.56
2039	2.44	1.38	0.67	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8811.24
2040	3.82	2.41	1.37	0.66	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9717.28
2041	5.59	3.78	2.38	1.35	0.65	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10645.54
2042	7.76	5.53	3.74	2.36	1.34	0.65	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11590.70
2043	10.34	7.67	5.47	3.70	2.33	1.32	0.65	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12547.38
2044	13.35	10.23	7.59	5.41	3.66	2.30	1.34	0.66	0.24	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13510.20
2045	16.79	13.20	10.12	7.51	5.35	3.62	2.33	1.35	0.67	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14473.85
2046	20.65	16.60	13.06	10.01	7.42	5.29	3.65	2.35	1.36	0.67	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	15433.18
2047	24.93	20.42	16.42	12.91	9.90	7.34	5.34	3.69	2.37	1.38	0.68	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	16383.29
2048	29.62	24.66	20.20	16.24	12.77	9.79	7.42	5.40	3.73	2.40	1.39	0.69	0.25	0.05	0.00	0.00	17319.59
2049	34.71	29.30	24.39	19.98	16.06	12.63	9.88	7.49	5.45	3.77	2.42	1.41	0.69	0.26	0.05	0.00	18237.81
2050	40.16	34.32	28.98	24.12	19.76	15.88	12.76	9.98	7.57	5.51	3.80	2.45	1.42	0.70	0.26	0.05	19134.14