

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS



**ANÁLISIS SOBRE LA FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE ECOEFICIENCIA EN LA
REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

LIMA SALINAS, FRANCISCO JAVIER

RIVERA SIGÜENZA, SAMUEL JOSÉ

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALAVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

ING. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TITULO:

**ANÁLISIS SOBRE LA FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE ECOEFICIENCIA EN LA
REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

PRESENTADO POR:

LIMA SALINAS, FRANCISCO JAVIER
RIVERA SIGÜENZA, SAMUEL JOSÉ

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

SAN SALVADOR, ENERO 2022.

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

AGRADECIMIENTOS

Es imposible agradecer a todas las personas que me han ayudado en momentos claves de la vida por las cuales yo he llegado hasta aquí. Aun así, estas líneas tratan de alguna manera de hacer justicia de lo profundamente agradecido que me encuentro.

Les agradezco a mis mejores amigos y a todos los amigos que he hecho a lo largo de todo mi paso por la universidad. Gracias por tantos buenos momentos que han sido fundamentales para sobre llevar la carga académica, aun cuando en estos últimos momentos he estado distante con algunos, no ha sido propósito. Le agradezco de manera especial a mi grupo de amigos, compañeros, aliados y cómplices, sobretodo a Vilma Montti que me auxilió en los últimos momentos.

Les agradezco a todos los buenos profesores que he tenido, en particular a Delmy Rico, por compartir su conocimiento, Rosmery Cerón y Nelson Vaquero, por auxiliarme en mi tema de memoria, con mucha flexibilidad y confianza para innovar.

Le agradezco a toda mi familia, por siempre estar en las buenas y en las malas, muy malas. Les agradezco infinitamente a todos, por siempre apoyarme. Y sobre todo le agradezco a mi madre, padre, hermanos y mis abuelos.

Gracias madre por hacer conmigo las tareas de gráfica, gracias por enseñarme tomar mis clases y esforzarme en mis estudios, gracias por dejarme ir a estudiar a la capital cuando lo pedí. Contigo tengo una deuda muy grande, que probablemente no poder pagar en el resto de mi vida.

A Josué Núñez por ayudarme más de lo que pensé, por acompañarme en cada jornada de desvelo y de trabajo, estaré eternamente agradecido por todo tu apoyo incondicional y prometo que cuando llegue tu momento estaré allí para brindarte mi apoyo como lo hiciste Muchas Gracias Hermano. Xavy...

RESUMEN.

La industria de la energía en El Salvador en el contexto de la descarbonización de la matriz energética debido al actual cambio climático que experimenta el planeta, ha incrementado la generación a partir de las energías renovables, contando con la energía solar fotovoltaica como alternativa, pese a que el uso de las energías renovables tiene como finalidad disminuir la contaminación y disminuir la emisión de gases, estas no son libres de la generación de residuos, convirtiéndose esto en una problemática de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que a largo plazo se afrontará en el país pero en a corto plazo se afrontará en el mundo, países como Chile y España están investigando lo métodos más eficientes de reciclaje en cuanto a este tipo de desechos que se generan.

Los paneles solares tienen vida útil muy amplia rondando entre los 25 y 30 años, de momento en El Salvador no existe planta tan longeva y que sus equipos hayan culminado su vida útil, pero a medida transcurren los años, estos residuos serán generados en la industria a largo plazo y para poder mantener el prestigio de esta alternativa renovable es necesario contar con una buena gestión.

Con la finalidad de contribuir a la buena gestión de esta problemática se realiza un análisis bibliográfico de la metodología de reutilización y reciclaje de paneles solares donde los resultados muestran que, en la actualidad las mejores opciones de implementación son los métodos de reciclaje térmico y químico, en contraste con el método mecánico, en base a los aspectos e impactos ambientales de cada uno de los procesos que conllevan los métodos descritos.

Finalmente con el objetivo de proponer alternativas de gestión sobre el reciclaje de paneles solares en El Salvador, se da una primera apreciación sobre el modelo a seguir y los procesos a llevar a cabo a fin de reciclar los residuos que puedan generarse al final de la vida útil de los paneles instalados en el territorio salvadoreño.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
ALCANCES	5
CAPÍTULO 1	6
MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	6
1.1 La energía fotovoltaica en El Salvador	6
1.2 Reutilización y reciclaje desde el punto de vista medio ambiental	10
1.3 Reutilización y reciclaje desde el punto de vista económico	13
CAPÍTULO 2	15
MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Generalidades	15
2.2 ¿Cómo se reutilizan los elementos reciclados?	25
CAPÍTULO 3	26
METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS	26
3.1 Métodos de investigación.....	26

3.2 Técnicas de reciclaje	26
3.3 Comparación de métodos.....	27
3.4 Métodos de reciclaje	28
3.5 Aspectos e impactos ambientales	36
3.6 Estimación de recuperación en El Salvador	39
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Matriz de generación acumulada septiembre 2021.	6
Figura 1.2 Generación mensual sector solar fotovoltaico periodo 2015-2020	7
Figura 1.3 Esquema de prioridad en el manejo de residuos.....	10
Figura 1.4 Esquema general de metodología.....	12
Figura 1.5 Costo de ciclo de vida de una planta solar fotovoltaica.....	13
Figura 2.1 Partes de un panel solar fotovoltaico	15
Figura 2.2 Esquema de montaje en un panel solar	18
Figura 2.3 Efecto fotovoltaico en una célula solar	21
Figura 3.1 Tecnologías de tratamiento	28
Figura 3.2 Proyectos de tecnología solar fotovoltaica	40
Figura 3.3 Importación anual de paneles solares a El Salvador	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Capacidad instalada por sector en la matriz energética.	8
Tabla 2.1 Cuadro comparativo entre silicio monocristalino y policristalino.	16
Tabla 2.2 Resumen modos de degradación.	24
Tabla 3.1 Recuperación de materiales en un proceso mecánico.	30
Tabla 3.2 Recuperación de materiales en un proceso de disolventes químicos.	31
Tabla 3.3 Recuperación de materiales en un proceso con degradación térmica.	33
Tabla 3.4 Aspectos e impactos ambientales en el reciclaje de paneles solares.	37
Tabla 3.5 Comparación de impactos ambientales causados por el reciclaje.	38
Tabla 3.6 Capacidad instalada por departamento.	39
Tabla 3.7 Importación anual de paneles solares a El Salvador	41
Tabla 3.8 Recuperación de desechos aplicando reciclaje.	42

INTRODUCCIÓN

En los últimos años El Salvador ha incrementado su industria energética mostrando una significativa alza en los proyectos de energías renovables, por la necesidad de minimizar sus emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera que la contaminan, entre las mejores alternativas de energías renovables y la más popular se encuentra la energía solar fotovoltaica con una amplia penetración en el todo el mundo y en el país, a día de hoy un 10.61% de la matriz energética proviene de la energía solar fotovoltaica siendo de las principales alternativas que se opta en El Salvador.

Sin embargo a pesar de ser una de las alternativas más optadas en el mundo entero, esta tecnología cuenta con dos grandes inconvenientes, el primero de ellos es en cuanto a la eficiencia, si bien la cantidad de energía que irradia el sol es equivalente a miles de millones de KWh, esta energía es de muy baja densidad, esto significa que es necesario colocar una gran cantidad de paneles para poder abarcar una superficie lo suficientemente amplia y así generar una potencia significativa. Por otro lado el segundo inconveniente tiene que ver con los aparatos eléctricos y electrónicos, pues el panel solar siendo un dispositivo electrónico, posee una vida útil la cual llegada a su fin, el dispositivo pasa a ser residuo.

Al analizar en conjunto estas problemáticas se encuentra una gran cantidad de residuos de paneles solares a largo plazo, residuos que significarán una contaminación para el medio, por lo que es necesario contar con un plan de acción, una gestión adecuada para este tipo de basura electrónica en la que se tenga la reutilización y reciclaje como principal acción, por lo que el presente trabajo de título tiene por finalidad realizar una investigación bibliográfica en cuanto a las generalidades del reciclaje de paneles solares abriendo las puertas de esta gestión en El Salvador para prevenir una acumulación de desechos y en cambio tener una gestión adecuada para el largo plazo que requieren estas tecnologías.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde el mes de febrero del año 2015, en El Salvador se ha inyectado a la red energía eléctrica proveniente de tecnologías fotovoltaicas, según datos que se han obtenido a través del portal del Consejo Nacional de Energía (CNE, 2021) y desde entonces la industria solar fotovoltaica ha experimentado aumentos considerables llegando al punto de duplicar la generación de este rubro en la matriz energética. No obstante el crecimiento de la generación energética está vinculada al crecimiento en los residuos del sector fotovoltaico.

En principio, estos residuos estarán compuestos fundamentalmente por vidrio, y la cifra podría ascender a 78 millones de toneladas a nivel mundial en el año 2050. Si se reciclan y se reutilizan la totalidad de los residuos generados, incorporándolos de nuevo a la cadena de producción, el valor del material recuperado alcanzaría, de forma aproximada, un beneficio económico de 15.000 millones de dólares. (Escuela Moreno, 2021)

Una de las corrientes actuales de valorización de residuos es la de aparatos eléctricos y electrónicos, en donde se pueden gestionar de manera correcta, lo cual permitirá generar materias primas disponibles para su venta en el mercado, o como suministro para la industria fotovoltaica u otros tipos de industrias, si se aplica un reciclaje en el momento óptimo.

Sin embargo no solo el reciclaje es una opción para los paneles, existe estudios de momento óptimo de reutilización o reciclaje, es decir, si el panel fotovoltaico es apto para seguirse usando o si la mejor opción es extraer el valor que tengan sus materiales constituyentes, esto con base a los resultados obtenidos en los estudios.

Para nuestro estudio de reciclaje, será útil definir en términos de su porcentaje en masa, los materiales que componen las estructuras: 76% cristal, 10% polímero, 8% Al, 5% Si, 1% Cu, 0,1% Ag (Ruiz Escudero, s. f.)

Por lo que las opciones de reciclaje encuentran valor para la recuperación de estos materiales, los cuales si no se les gestiona suponen un problema para el medio ambiente salvadoreño, debido a que el país no cuenta con opciones de disposición final y sin embargo está aumentando la cantidad de paneles instalados.

En los últimos años se han desarrollado nuevas plantas solares fotovoltaicas encaminadas al aprovechamiento de las energías renovables en la captación de luz solares que son menos contaminantes. Por lo cual en la siguiente investigación se presenta un análisis sobre la factibilidad de aplicación de ecoeficiencia en la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos. Ofreciendo así alternativas para la problemática futura concerniente a la cantidad de desechos fotovoltaicos en El Salvador.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

1. Realizar un análisis de ecoeficiencia que permita evaluar la factibilidad de su aplicación en la reutilización y el reciclaje de paneles solares fotovoltaicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Conocer conceptos y generalidades básicas en el desarrollo de la reutilización y reciclaje de la tecnología solar fotovoltaica mediante una investigación bibliográfica.
2. Identificar el impacto medioambiental en las distintas formas de reutilización y reciclaje de los paneles fotovoltaicos.
3. Caracterizar la degradación de los paneles y determinar el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista ecoeficiente.
4. Determinar las alternativas más ecoeficientes para el reciclaje de paneles solares fotovoltaicos.

ALCANCES

1. Los proyectos solares fotovoltaicos consisten en muchos elementos: estructuras, inversores, cableados, paneles, etc. Esta memoria solo se centra en la degradación y reciclaje de los paneles solares.
2. De la misma manera el reciclaje de los paneles solares es un tópico nuevo en el mundo, por lo tanto, no presenta una gran disponibilidad de información, por lo que su cuantificación se realiza solo con la información disponible, es decir, sin recurrir a experimentación, pues no se cuentan con los medios necesarios para ello. Aun así, la metodología seguida tiene como propósito el dar flexibilidad para mejoras futuras en esa dirección.
3. Se establecerá la contaminación generada en el reciclaje de paneles solares con base a los aspectos e impactos ambientales generados esto a partir de las revisiones bibliográficas consultadas (revistas especializadas, trabajos de investigación y sitios web académicos u otras fuentes verificadas) para poder de esa manera estimar la ecoeficiencia del método de reciclaje.

CAPÍTULO 1

1. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

1.1 La energía fotovoltaica en El Salvador

En la actualidad El Salvador cuenta con una matriz energética muy variada, desde la biomasa, la cual es muy utilizada en los sectores rurales del país, hasta bunker e hidroeléctrica de empresas organizadas. Ciertamente las energías renovables están tomando auge en la nación y con la participación de la energía eólica aumenta el porcentaje de energías provenientes de recursos renovables.

Entre las tecnologías para la generación de energía renovable encontramos los paneles solares fotovoltaicos, estos se traducen en disminución de impacto ambiental debido a que se minimizan las emisiones de CO₂ por generación de energía, esta tecnología solar fotovoltaica a día de hoy ha generado el 10.61% de la energía inyectada a la red como se observa en la figura 1.1.

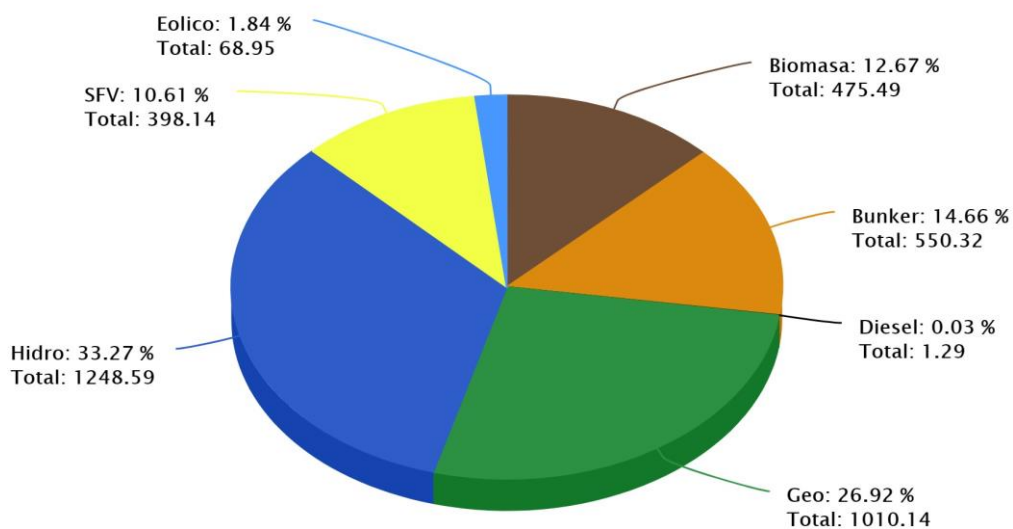


Figura 1.1 Matriz de generación acumulada septiembre 2021. (CNE, 2021)

El aumento de las energías renovables y en particular de la energía solar fotovoltaica, que anteriormente parecía estar a largo plazo, se fue creando en un periodo de cinco años como se puede observar en la figura 1.2, pues desde 2015 a 2019 no se presentaba un aumento masivo, sin embargo entre el año 2019 y 2020 el porcentaje de inyección por parte de este sector aumentó de 4.18% a 9.25% como lo refleja el concejo nacional de energía de El Salvador.

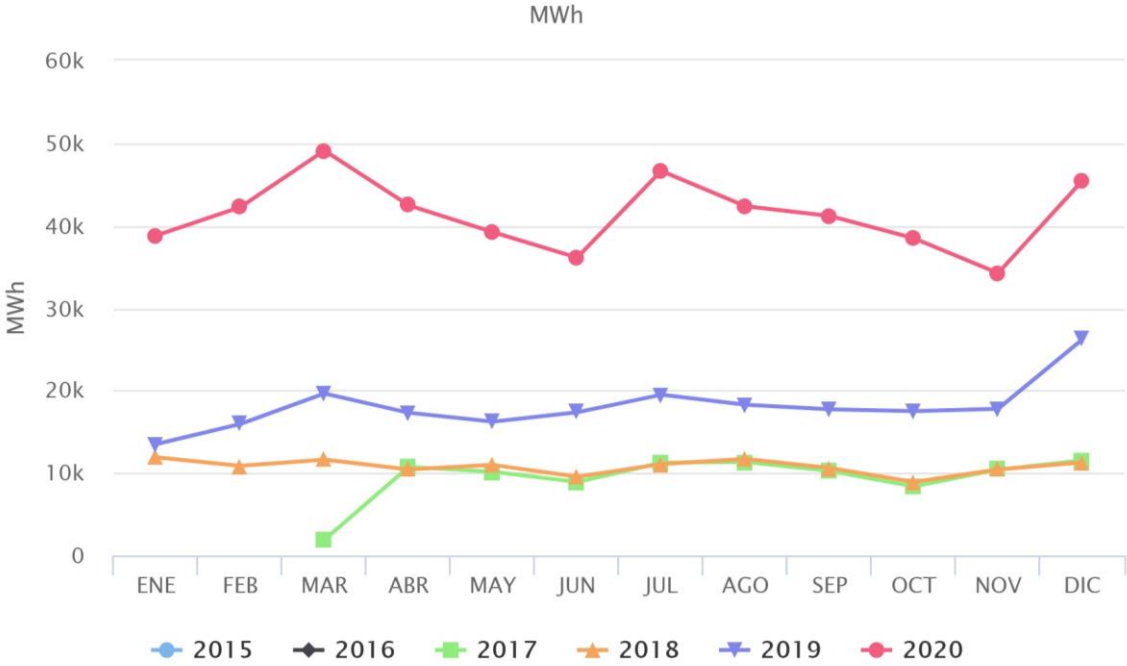


Figura 1.2 Generación mensual sector solar fotovoltaico periodo 2015-2020. (CNE, 2021)

Es una realidad que el aumento en la obtención de energías renovables disminuye los impactos ambientales, sin embargo se necesita tener en cuenta que para poder generar más de esta energía es necesario adquirir más equipos que la produzcan y tal como se muestra en el informe presentado por el SIGET llamado “ Mercado Eléctrico de El Salvador” presentado en abril de 2021, la capacidad instalada aumentó en un porcentaje considerable como se muestra en la Tabla 1.1 y con ello el número de equipos generadores de electricidad.

Tabla 1.1 Capacidad instalada por sector en la matriz energética.

Generadoras	Capacidad Instalada				Variación %
	2019		2020		
	MW	%	MW	%	
Hidráulica	573.79	25.4	573.79	24.3	0.00
Geotérmica	204.40	9.1	204.40	8.7	0.00
Combustible fósil	771.11	34.2	771.11	32.7	0.00
Biomasa	293.60	13.0	293.60	12.4	0.00
Solar	406.33	18.0	474.46	20.1	16.77
Biogás	6.85	0.3	6.85	0.3	0.00
Eólica	-	0.0	36.0	1.5	100.00
Total	2256.08	100	2360.21	100	4.62

Fuente: Adaptado de (SIGET, 2021).

A partir de esto es posible notar que, a un mediano o largo plazo, estos paneles llegaran al final de su vida útil, por ello es necesario gestionar la cantidad de futuros residuos que se pueden generar en el país y la forma más ecoeficiente de volver a darle valor, por lo que se vuelve necesario conocer el tipo de residuo que se prevé que será generado.

Dado que los paneles solares se degradan y son desechados, se debe encontrar una manera de reutilizarlos y/o reciclar, El reciclado de los paneles es obligatorio por ley gracias a la Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Según la directiva los paneles fotovoltaicos.

El reciclaje aporta, hoy en día, numerosos beneficios para el medio ambiente, pero también representa otras ventajas para las empresas que lo aplican. Gracias al reciclaje de paneles solares se pueden recuperar cantidades de metales, plástico y vidrio para reintroducirlos en el proceso productivo para la elaboración de nuevos productos y aprovechamiento de los mismos.

Es innegable que habrá un incremento en el consumo de paneles solares, a fin de aumentar la generación eléctrica renovable y se estima que la vida útil de estos ronda entre los 25 a 30 años, momento en el cual habría que procesarlos mediante algún método de reciclaje para recuperar materiales de su constitución o en su defecto desecharlos para disposición final.

1.2 Reutilización y reciclaje desde el punto de vista medio ambiental

Se tiene en cuenta la falta de información publicada especializada, principalmente por la naturaleza sumamente compleja y multidisciplinaria de la pregunta, ¿En qué momento es óptimo reutilizar o reciclar un panel solar fotovoltaico? pero se tiene que proceder tomando como base un estudio de afectación de generación de CO₂ para decidir si reciclar o reutilizar un panel solar.

Lo que se busca es una curva de comportamiento de generación de CO₂ y su variación respecto al tiempo, a medida que se recicla o no un panel, haciendo uso de un análisis de ciclo de vida temporal. Teniendo en cuenta que los métodos de reciclaje de paneles, antes mencionados, tienen tasas de recuperación distintas de materiales y están diseñados para niveles diferentes de degradación, o sea, a medida que el tiempo transcurre, la degradación del panel aumenta, inversamente la tasa de recuperación disminuye.

CEPAL propone en su manual número 2 un esquema de prioridad en el manejo de residuos, que consiste en, de ser posible, prevenir la producción de los desechos, a través de ciertas alternativas, luego minimizar el uso reduciendo su volumen inicial, reutilización, después un reciclaje y finalmente contención de desechos o disposición final.

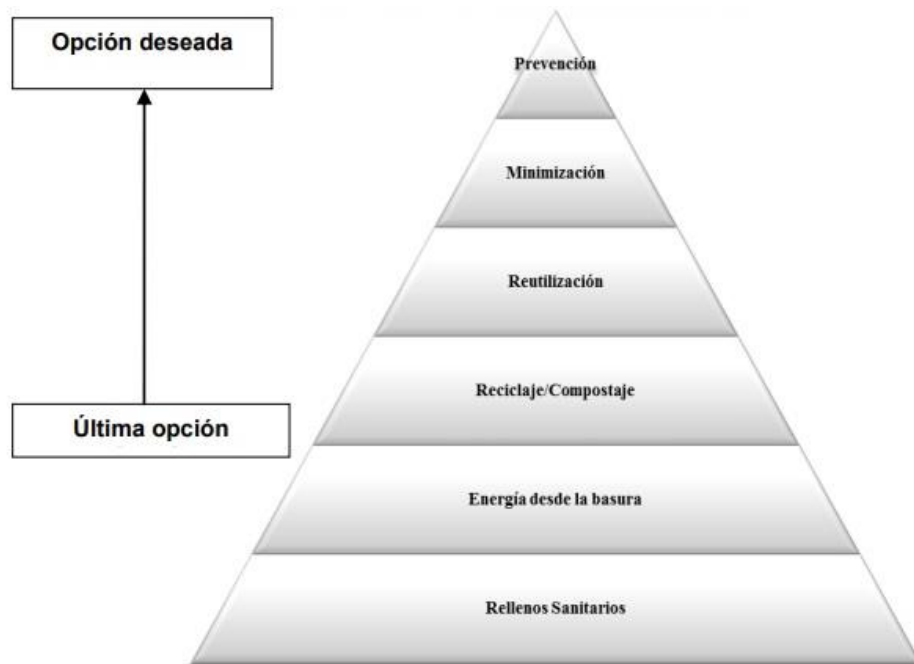


Figura 1.3 Esquema de prioridad en el manejo de residuos. (CEPAL, 2016)

El efecto de la degradación condiciona la reutilización de un módulo fotovoltaico, ya que hay que tener en cuenta este criterio a la hora de decidir si posee suficiente valor para aplicar un método de reciclado. Si se posee una degradación de 0.75 o más, no posee valor para un método térmico, puesto que es un método costoso y está pensado para un alto rendimiento en la tasa de recuperación de metales. Para el caso de degradación de 0.75 o mayores, los paneles muestran fallas estructurales muy relevantes y generalmente se suelen reciclar por procesos mecánicos para evitar que el modulo se elimine completamente a la basura. (Romero Campos, 2019)

Dado que cada panel solar se degrada y produce menos energía, se tiene que considerar este factor a la hora de hacer el análisis de ciclo de vida y considerar la viabilidad de continuar produciendo un poco más de energía, pero con ello aumentar el nivel de degradación, lo que afecta mayormente en el impacto medio ambiental en el reciclaje por no tener en cuenta la prioridad en el manejo de residuos.

Pasos para determinar el momento óptimo de reutilización y reciclaje:

- a) Consolidar información sobre la degradación de los paneles solares.
- b) Consolidar el estado de los paneles solares en El Salvador modelando la producción de una planta solar, con el fin de que los resultados tengan un acercamiento directo con la industrial en El Salvador, ya que se hace necesario modelar con la marca y tipo de panel más ampliamente usado.
- c) Modelar las curvas de degradación con la información recolectada, se elaboran dichas curvas de rendimiento a lo largo de la vida útil del panel.
- d) Ordenar los métodos de reutilización y reciclaje con base a la comparación de los métodos expuestos.
- e) Realizar un análisis de ciclo de vida con temporalidad e interpretar resultados sobre producción de energía y degradación.

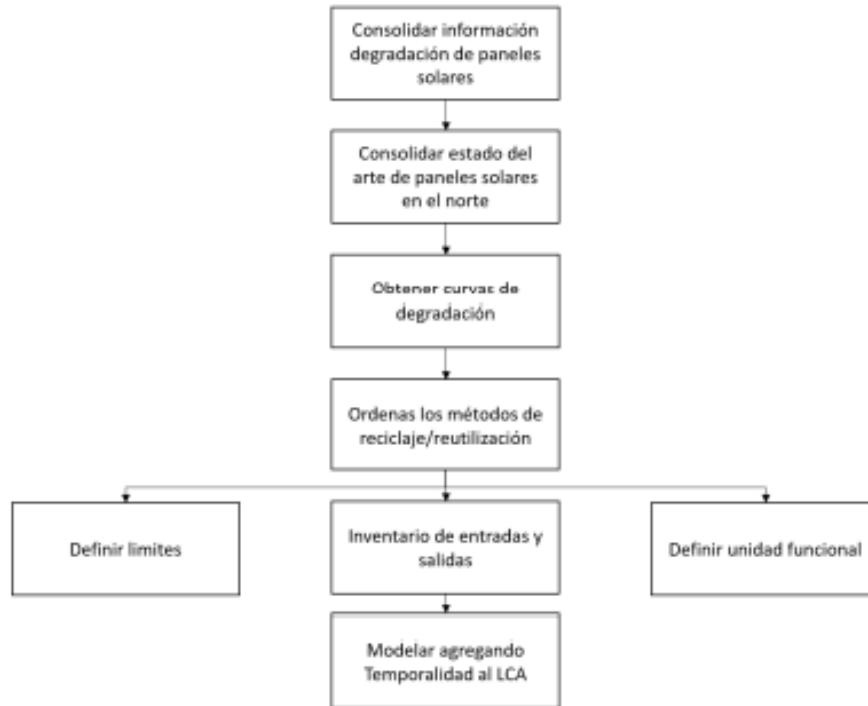


Figura 1.4 Esquema general de metodología. (Romero Campos, 2019)

Una vez obtenidos los resultados y analizados los valores de degradación y generación de energía, es posible determinar si el panel es apto para reutilizarse, es decir que mantiene una generación significativa, en caso contrario, se puede determinar una opción de reciclaje para dicho panel, sin embargo estos resultados es necesario compararlos con el momento óptimo de reemplazo desde el punto de vista económico.

1.3 Reutilización y reciclaje desde el punto de vista económico

Al haber analizado los resultados del momento óptimo de reutilización y reciclaje desde el punto de vista medio ambiental, se procede a comparar con los resultados obtenidos en un momento óptimo de reutilización y reciclaje desde el punto de vista de la economía del productor de energía, para ello se propone utilizar el método del costo de ciclo de vida.

El costo de ciclo de vida es una metodología que busca cuantificar todos los flujos de ingresos y costo por los que atraviesa un activo a lo largo de toda la vida útil, con el fin de tomar decisiones estratégicas tales como: Reducir costos, mejorar la cadena de valor, decisiones de inversión y para los paneles solares en específico, cuando realizar el reemplazo de un activo. (Romero Campos, 2019)

Esquema de costo de ciclo de vida:

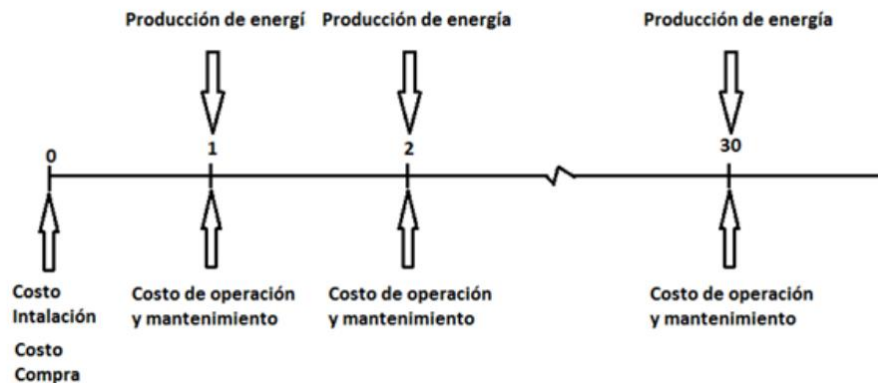


Figura 1.5 Costo de ciclo de vida de una planta solar fotovoltaica. (Romero Campos, 2019)

En primer lugar, se disponen de costos de instalación y compra en el año de inicio del proyecto, y además en cada año que sigue se tienen costos de operación y mantenimiento de los equipos, por otro lado, la venta de la energía a lo largo de los años produce una fuente de ingresos, pero, se debe considerar que los paneles se degradan por lo que cada año producen menos energía y aumentan sus costos de operación y mantenimiento. (Romero Campos, 2019)

Para determinar si el bien puede reutilizarse o reciclarse, en este caso los paneles, es recomendable hacer uso del indicador económico denominado CAUE Costo Anual Uniforme Equivalente por sus siglas, calculándose a través de la ecuación:

$$CAUE = VAN \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1}$$

Pasos:

- a) Definir una unidad funcional.
- b) Para la unidad funcional definir los flujos de entrada y salida de capital (Ingresos y costos).
- c) Construir la gráfica.

Una vez obtenidos los resultados de la gráfica es posible analizar y determinar si el panel es apto para reutilizarse o si la mejor opción es reciclarlo y valorizar las partes que este contenga, teniendo en cuenta los resultados del momento óptimo medio ambiental y económico.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

Un panel solar fotovoltaico consiste en un arreglo de entre 36 a 92 células fotovoltaicas puestas en serie y paralelo en un marco de aluminio. Estas se encuentran aisladas del exterior mediante un cristal que sirve para protegerlas de los agentes atmosféricos que les pueden afectar cuando están trabajando en la intemperie, y además le proporcionan rigidez mecánica y aislando eléctrico del exterior. (Romero Campos, 2019)

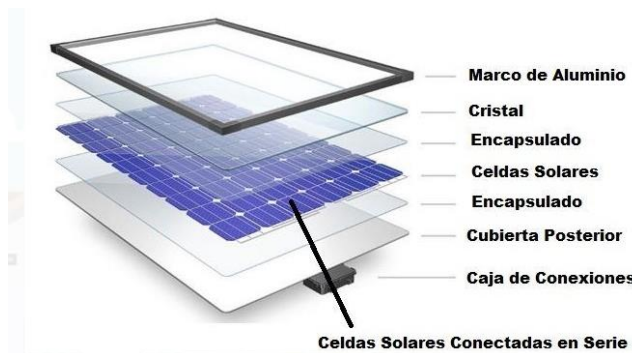


Figura 2.1 Partes de un panel solar fotovoltaico. (UGB, 2021)

- Panel monocristalino:** Son fabricados con mono cristales de silicio lo cual permite que sean más puros, sin embargo, el costo de fabricación es más elevado, pero estos tienen mayores tasas de eficiencia y vidas útiles más largas, justificando así su alto valor comercial. Este tipo de panel se daña al ser cubierto por sombra, nieve o polvo.
- Panel poli cristalino:** Este tipo de paneles son realizados por simple fundición y modelado, eso da lugar a que existan menos pérdidas de materiales y de energía en su fabricación. Esto ayuda a que el costo de los paneles sea más bajo en comparación a otro tipo de panel.

Tabla 2.1 Cuadro comparativo entre silicio monocristalino y policristalino.

Silicio	Ventajas	Desventajas
Monocristalino	<p>a) Tienen las mayores tasas de eficiencia puesto que se fabrican con silicio de alta pureza.</p> <p>b) La vida útil de los paneles monocristalinos es más larga.</p> <p>c) Suelen funcionar mejor que los paneles policristalinos de similares características en condiciones de poca luz.</p> <p>d) Aunque el rendimiento en todos los paneles se reduce con temperaturas altas, esto ocurre en menor medida en los monocristalinos que en los policristalinos.</p>	<p>a) Son más caros.</p> <p>b) Si el panel se cubre parcialmente por una sombra, suciedad o nieve, el circuito entero puede averiarse.</p> <p>c) Para hacer las láminas de silicio, se derrocha una gran cantidad de silicio en el proceso.</p>
Policristalino	<p>a) El proceso de fabricación de los paneles fotovoltaicos policristalinos es más simple, lo que redonda en menor precio. Se pierde mucho menos silicio en el proceso que en el monocristalino.</p>	<p>a) Los paneles policristalinos suelen tener menor resistencia al calor que los monocristalinos.</p> <p>b) La eficiencia de un panel policristalino se sitúa típicamente entre el 13-16%.</p> <p>c) Mayor necesidad de espacio.</p>

Fuente: Adaptado de (Gómez Escorial, 2017)

Características eléctricas de los paneles solares: diferentes parámetros que vienen dados en la ficha técnica:

- a) **Intensidad de cortocircuito (I_{cc} o I_{sc}):** es aquella que se produce a tensión 0 voltios, por lo que puede ser medida directamente en bornes mediante un amperímetro. Su valor variará en función de las condiciones atmosféricas de medida.
- b) **Tensión de circuito abierto (V_{ca} o V_{oc}):** es la tensión máxima del panel, se puede medir al no tener ninguna carga conectada, directamente con un voltímetro, su valor variará en función de las condiciones atmosféricas.
- c) **Potencia máxima (P_{max}), medida en vatios pico (W_p):** es la potencia máxima que puede suministrar el panel, es el punto donde el producto intensidad y tensión es máxima, bajo unas condiciones estándar de medida.
- d) **Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}):** es la corriente producida cuando la potencia es máxima, bajo unas condiciones estándar de medida.
- e) **Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}):** es la tensión producida cuando la potencia es máxima, bajo unas condiciones estándar de medida.
- f) **Eficiencia (%):** este parámetro nos define la eficiencia de conversión (η), la cantidad de potencia radiación incidente sobre el panel que es capaz de convertirse en potencia eléctrica.

2.1.1 Composición de una célula fotovoltaica y funcionamiento.

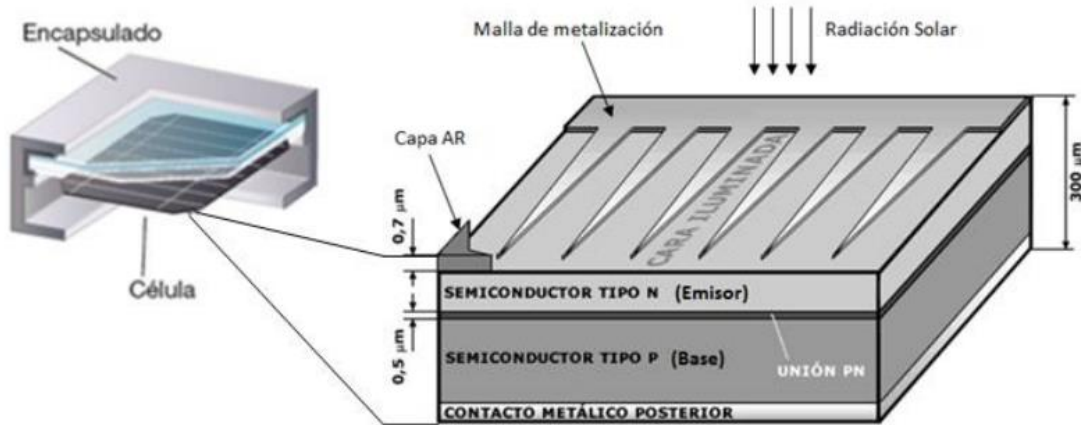


Figura 2.2 Esquema de montaje en un panel solar. (Gómez Escorial, 2017).

Las capas que se pueden encontrar en una célula solar desde la que recibe la radiación solar hasta la cara posterior son:

- Capa antirrefleтора (capa AR): Para poder reducir más la pérdida de reflexión, estos paneles poseen una capa antirreflectante, la cual se logra teniendo en cuenta variables como el índice de refracción, la longitud de onda y un intervalo lo más amplio posible del espectro a la hora de su diseño. Esta capa puede ser compuesta por varias capas más, lo que hace que la reflectancia sea la más pequeña en una longitud de onda determinada, creando un espectro más amplio. A parte de estas capas, para reducir más la pérdida de reflexión, se crean celdas con superficies ranuradas, micro-pirámides y otras texturas.
- Malla de metalización: Se puede observar en forma de peineta en la figura 2.2, no obstante puede adoptar diversas formas, las que le permitan ingreso de la cantidad suficiente de luz. Esta malla de igual forma que la capa antirrefleтора, encuentra su punto crucial en el diseño, ya que esta debe garantizar una generación que sea lo suficientemente significativa, mediante la recolección adecuada de electrones. El metal que conforma la malla de metalización es un material opaco a la luz, por lo

que el contacto frontal debe permitir el ingreso de luz a la superficie de la célula. Entonces si el tamaño de la malla es muy pequeño, se añade una resistencia eléctrica y una disminución en la eficiencia de la placa. Por otra parte se debe diseñar una superficie de tal forma que la resistencia de la célula sea adecuada. Otra condición importante a la hora de diseñar esta superficie es el factor de sombra, que consiste en la cantidad de superficie que ocupa la malla de metalización con respecto al área total del dispositivo.

- c) Las capas activas del material semiconductor: En estas se encuentran las regiones denominadas p base – n emisor. De manera usual estas se encuentran depositadas en la base que presenta mayor resistencia mecánica, también, la concentración de impureza influirá en el rendimiento, dependiendo de la calidad que presente el semiconductor y el espesor de las capas p-n.
- d) Contacto metálico posterior: Si el dispositivo no necesita recibir luz por la parte posterior, se puede metalizar toda la superficie que lo conforma para no bloquear los rayos solares y transmitir los electrones al semiconductor.

A partir de esta estructura básica, se han introducido numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Éste es el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, una unión entre distintos materiales semiconductores o dispositivos más sofisticados que pueden presentar más de una unión en su estructura. Aparecen, además, capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato. (Gómez Escorial, 2017).

2.1.2 Efecto fotovoltaico.

Es necesario considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol para entender la operación de una célula fotovoltaica. Una célula solar se comporta como un diodo: la zona n es la parte expuesta a la radiación solar mientras que la parte situada en la franja de oscuridad es la zona p, la cual corresponde a la zona que se encuentra metalizada por completo, por lo que no tiene que recibir luz, mientras en la zona n, el metalizado tiene forma de peine con el fin de que la radiación solar llegue al semiconductor.

Por lo general las células funcionan bajo el efecto fotovoltaico, mediante el cual la energía irradiada por el sol se transforma parcialmente en energía eléctrica, esta energía eléctrica producida puede conducir una corriente que es capaz de alimentar una diversidad de equipos electrónicos. En el momento que sea necesario producir una gran cantidad de energía eléctrica, será necesario instalar grandes cantidades de paneles solares para poder suplir la demanda.

El proceso de funcionamiento de las células solares es el siguiente: Cuando una célula solar está expuesta a la luz, al estar formada por un material semiconductor con una carga positiva (p) y una carga negativa (n), permite que un fotón de la luz solar “arranque” un electrón. Ese electrón libre deja un “hueco” el cual será llenado por otro electrón que a su vez fue arrancado de su propio átomo. El trabajo de la célula es provocar que los electrones libres vayan de un material semiconductor a otro en busca de un “hueco” que llenar. Esto produce una diferencia de potencial y por tanto una corriente eléctrica, es decir, que se producirá un flujo de electricidad del punto de mayor potencial al de menor potencial hasta que en los dos puntos el potencial sea el mismo. (Gómez Escorial, 2017).

La figura 2.3 muestra el funcionamiento del efecto solar fotovoltaico en una célula.

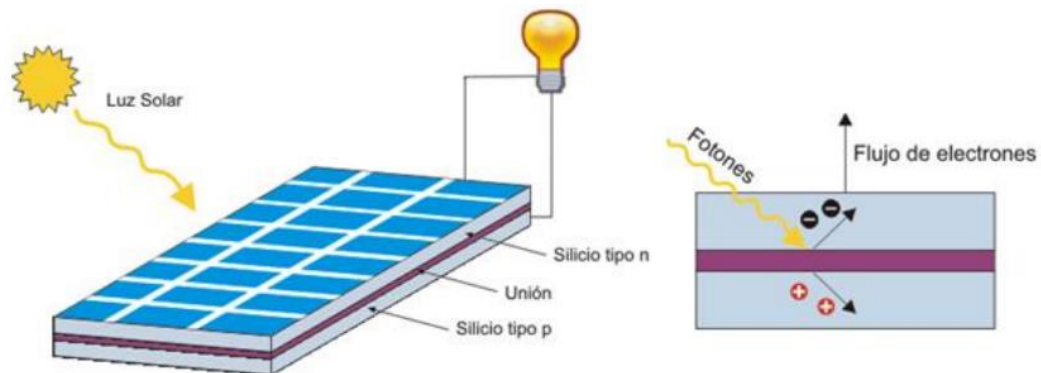


Figura 2.3 Efecto fotovoltaico en una célula solar. (Gómez Escorial, 2017).

2.1.3 Fin de la vida útil de los paneles solares.

Como anteriormente se ha mencionado, actualmente existe una gran cantidad de toneladas de paneles solares instalados en el país, que al cabo de algunos años llegaran al final de su vida útil y será necesario saber cómo disponer de dichos residuos a fin de minimizar los impactos ambientales.

Se define la degradación de un panel solar fotovoltaico como efectos físicos (o modos de falla), los cuales repercuten disminuyendo la potencia o energía entregada por este dispositivo. (Romero Campos, 2019)

Los modos de falla más usuales son:

- a) **Hot Spot:** Son áreas de temperatura elevada que afecta solo a una parte del panel solar. Son el resultado de una disminución localizada de la eficiencia, que se traduce en una menor potencia de salida y una aceleración de la degradación de los materiales en el área afectada. (Romero Campos, 2019)
- b) **Delaminación:** Es un proceso mediante el cual ocurre la separación entre el vidrio y la célula, por desgaste de la EVA. (Romero Campos, 2019)
- c) **Falla humana:** Durante la manipulación en la instalación, y la operación es posible producir roturas en los paneles, esto termina con la vida del panel. (Romero Campos, 2019)
- d) **Decoloración:** Es un cambio de color en el material de blanco a amarillo y, a veces, de amarillo a marrón. Provoca un cambio en la transmitancia de la luz que llega a las células solares, y por lo tanto, una disminución en la potencia generada. (Romero Campos, 2019)
- e) **Crack:** Las microgrietas consisten en pequeñas grietas en las celdas que generalmente no son visibles a simple vista, y que pueden afectar ambos lados de la celda. Producen una pérdida en la consistencia celular y una posible ruta de recombinación del portador. Cada uno de estos efectos que ocurren en un panel solar y combinados producen que el panel se degrade, y en consecuencia que sea desechado. Debido a esto es necesario que las plantas solares cuantifiquen y traten de predecir la degra-

dación de esta forma mantener la planta en su capacidad óptima. (Romero Campos, 2019)

- f) **Corrosión:** La entrada de humedad a través del laminado produce corrosión. La retención de la humedad en el interior del módulo fotovoltaico incrementa la conductividad eléctrica de los metales existentes apareciendo corrientes de fuga. La corrosión también ataca la adhesión entre las células y el borde metálico (normalmente) aluminio produciendo delaminación y favoreciendo la entrada de más humedad. (Reguera Gil, 2015)
- g) **Burbujas:** Este modo de degradación es similar a la delaminación, pero en este caso la pérdida de adhesión del encapsulante solo afecta a un área pequeña, en cierta forma es un aviso de una futura delaminación. (Reguera Gil, 2015)
- h) **Degradación inducida por potencial:** Este modo de degradación se debe a las conexiones serie que tienen lugar entre los diferentes módulos fotovoltaicos. Al ser conectados en serie se produce una suma de las tensiones de cada uno de los módulos con lo cual se puede llegar fácilmente a varios cientos de voltios en una rama (normalmente 300-500 V). (Reguera Gil, 2015)
- i) **Descargas eléctricas:** Debido a la ubicación exterior de los módulos fotovoltaicos estos se pueden ver sometidos a descargas eléctricas provenientes de tormentas (relámpagos). Dichas descargas eléctricas pueden dañar el módulo fotovoltaico ya sea a través de descarga directa o mediante el acoplamiento magnético que se produce. (Reguera Gil, 2015)

Tabla 2.2 Resumen modos de degradación.

Modo de degradación	Factor ambiental
Decoloración	Radiaciones ultra violeta.
Delaminación	Calor y humedad.
Corrosión	Humedad
Hot Spot	Sombreamiento parcial, fallo de fabricación.
Burbujas	Calor y humedad.
Crack	Granizo, actos vandálicos, fallo de fabricación.
Degradación inducida por potencial	Calor y humedad.
Descargas eléctricas	Relámpagos.

Fuente: Adaptado de (Reguera Gil, 2015)

En cuanto a la degradación de un panel solar de forma simple se denota con la letra D que representa el cociente entre la potencia entregada y la potencia nominal.

Los principales modelos de degradación que se usan son:

- c) **Lineal:** La degradación es constante a lo largo del tiempo, y es de la forma $D(t) = P_0(1 - at)$, donde P_0 es la potencia de salida inicial en el momento 0, a es el coeficiente de degradación y t el tiempo en años (NIST, 2016).
- d) **Exponencial:** Esta relación lineal no tiene el respaldo experimental suficiente para darla como válida, con lo cual es más ajustado atenernos a una relación exponencial que es más adecuada para elementos optoelectrónicos: $P(t) = P_0e^{-\alpha t}$ Donde α es el factor de degradación del elemento y que dependerá de diversas cuestiones

tales como pueden ser las condiciones de operación o el material en el que está fabricado debiendo ser obtenido experimentalmente (Reguera Gil, 2015).

Generalmente la degradación lineal brinda una aproximación de primer orden y es utilizada para determinar la garantía de estos productos, mientras que la degradación exponencial es más utilizada en contextos donde es necesario disminuir la incertidumbre, como puede ser en proyectos de plantas fotovoltaicas. Estos modos de degradación son provocados principalmente por factores ambientales, de operación de la planta fotovoltaica y el tipo de material del panel, entre los factores ambientales podemos encontrar la radiación solar, radiación ultravioleta, humedad, nieve, viento, polvo etc.

2.2 ¿Cómo se reutilizan los elementos reciclados?

- a) **El vidrio:** El vidrio es uno de los materiales que resulta sencillo de reciclar y su reciclaje no tiene un final. Este es bien utilizado para producir fibra de vidrio, productos de aislamiento, envases de vidrio, frascos entre otros.
- b) **Aluminio:** Este material presenta un reciclaje casi infinito y el marco presente en los paneles solares es de aluminio, esto permite rehacer objetos como latas, inclusive nuevos marcos para futuros paneles.
- c) **El Silicio:** Aporta el valor necesario para que se pueda llevar a cabo el reciclaje, ya que puede ser utilizado para hacer nuevas células fotovoltaicas o bien puede ser procesado mediante una fundición e integrarlo a un nuevo lingote de silicio para cualquier otro dispositivo electrónico.
- d) **El plástico:** Este material puede ser derretido y ser usado como materia prima o fabricar piezas de plástico que fungan como materia prima.
- e) **El Cobre y plata:** Es necesario un proceso específico para recuperar este tipo de mineral que puede ser utilizado en la fabricación de cualquier dispositivo eléctrico.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS

3.1 Métodos de investigación

Mediante la investigación bibliográfica se ha recopilado información sobre el reciclaje de paneles solares, tomando como referentes a Chile y España, países que se mantienen a la vanguardia en el avance de las tecnologías de reciclaje de paneles solares, con propuestas de metodologías, procesos y etapas a desarrollar para disminuir los aspectos e impactos ambientales y de esta forma llevar a cabo la adecuada gestión de los residuos o de equipos obsoletos.

De acuerdo a la investigación realizada se proponen métodos, técnicas y procesos a seguir que se consideran los más adecuados para que El Salvador esté preparado para reciclar estos residuos cuando llegue el momento de su generación.

3.2 Técnicas de reciclaje

El programa de sistemas fotovoltaicos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), estima que en el año 2050 los residuos de paneles podrían alcanzar una cifra de 78 megatoneladas a nivel mundial. Sin embargo, mediante el reciclaje y recuperación, se podrían aprovechar produciendo de nuevo 2 mil millones de paneles.

Esto quiere decir que, si se lleva a cabo este tipo de procedimientos de manera correcta, la energía solar implicaría un proceso aún más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Hasta el momento existen dos procesos de reciclado de placas solares más usados: térmico y mecánico.

- a) **Reciclado Térmico:** Es un tratamiento térmico que consiste en quemar los plásticos para separar las células del vidrio. Después de esto se somete a diferentes procesos químicos para eliminar la capa anti reflectante, si existiese, y separar los contactos metálicos. Las obleas de silicio también se pueden reutilizar.

- b) Reciclado mecánico:** Consiste en moler todo el panel despejado del marco para después ser trabajado por procesos químicos especializados para la obtención de materiales secundarios.

3.3 Comparación de métodos

En su mayoría las empresas de reciclaje suelen utilizar un procedimiento térmico, el que consiste en incinerar los plásticos para dividir las células del vidrio, una vez separadas se tratan las células químicamente para desechar los contactos metálicos, donde se restaura el silicio para crear nuevas células fotovoltaicas o para derretirse e integrarse en un lingote

El reciclaje de paneles solares permite restaurar una gran cantidad de materias primas, las que fácilmente pueden encontrar valor de reutilización brindando de igual forma una buena imagen medioambiental a la empresa.

Pese a las crecientes implementaciones de paneles solares y al paso del tiempo en que El Salvador adoptó estas tecnologías, sin tener una gestión para cuando estos fueran residuos, actualmente no es urgente una gestión, pues este tipo de bien aún no llega al final de su vida útil, sin embargo, es necesario que se integre una solución a corto plazo para los residuos, una adecuada gestión de estos por lo que inicialmente se proponen dos fases de reciclaje:

De la misma forma un método más sistematizado de reciclar paneles solares es tal como se muestra en la figura 3.1.

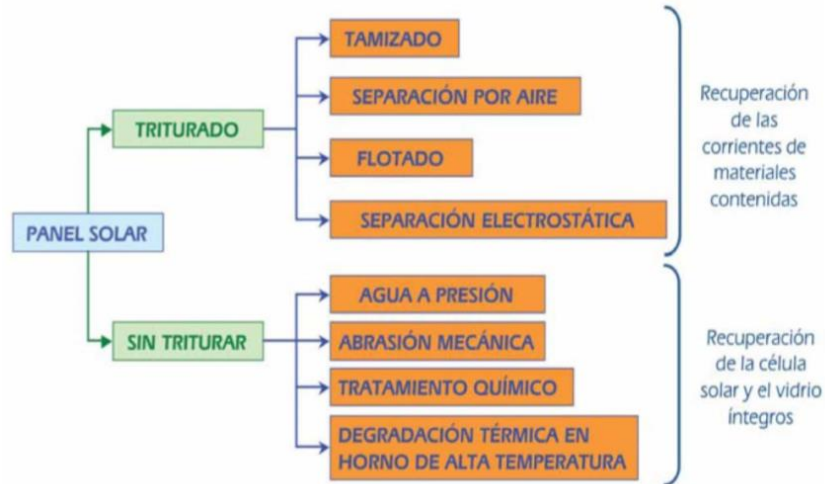


Figura 3.1 Tecnologías de tratamiento. (Escuela Moreno, 2021).

3.4 Métodos de reciclaje

Luego de ser desmontado el módulo, marcos de aluminio y las cajas de conexiones, estos deben ser triturados para poder reducir su tamaño y así separar con mayor facilidad los componentes que conforman el panel, haciendo uso de propiedades como pueden ser dimensiones, densidades, propiedades magnéticas y propiedades eléctricas.

Entre estos métodos de separación principalmente se encuentran el triturado, el cribado, la clasificación neumática y la separación electrostática.

3.4.1 Trituración mecánica

- a) **Triturado:** Los materiales se trituran hasta un determinado espesor esto con el fin de obtener a la salida la célula triturada, trozos de metal, vidrio triturado y restos de EVA.
- b) **Cribado o tamizado:** Es posible separar el vidrio, así como los materiales metálicos y los polímeros, por medio de vibraciones o movimientos en un sistema de cribado con ayuda de una malla que garantice la separación entre las partículas de acuerdo a sus dimensiones.

- c) Clasificador neumático:** Al utilizar este tipo de clasificadores se pueden separar las fracciones a través de impulsos de aire, en función de la densidad de los materiales. De esta forma, permite clasificar las fracciones que son ligeras, las que pueden ser descargadas, y las pesadas, que se destinan al siguiente proceso por ser material deseado.
- d) Separación electrostática:** Los materiales no conductores se pueden separar de otros elementos conductores, por medio de campos eléctricos.

Tabla 3.1 Recuperación de materiales en un proceso mecánico.

Concepto	Unidad	Sale del proceso
Gases de efecto invernadero	Kg	1,010
Aluminio	Kg	185
Vidrio	Kg	680
Plástico (EVA)	Kg	1.6
Silicio	Kg	1.24
Otros metales	Kg	2

Fuente: Adaptado de (Romero Campos, 2019)

3.4.2 Uso de disolventes químicos.

Si el tipo de reciclaje que se va a realizar no es mecánico es decir no se triturará el panel, existen otros procedimientos como los tratamientos químicos y los tratamientos térmicos, los que permiten separar los componentes del panel.

Este tipo de procedimiento que implica el uso de sustancias químicas no siempre resulta factible, aunque pueden ser utilizados para descomponer la capa de EVA para extraer de manera intacta los materiales restantes, aunque es necesario tener en cuenta que si este procedimiento no se aplica correctamente la célula puede sufrir daños por la exposición a los agentes químicos.

Una vez recuperada la célula fotovoltaica, se realiza un ataque químico sumergiéndola en una solución que contiene ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido acético (CH₃COOH) y agua destilada. Luego se procede

a su agitación durante 60 minutos a temperatura ambiente. Para finalizar este proceso de eliminación de impurezas, se añade un agente surfactante (como puede ser CMP-MO-2) y se mantiene en reposo un tiempo inferior a 20 min, que es la duración óptima para la recuperación en el caso del silicio. De esta manera, se obtiene dicho elemento separado de todas las impurezas metálicas presentes en la célula. (Escuela Moreno, 2021).

Tabla 3.2 Recuperación de materiales en un proceso de disolventes químicos.

Concepto	Unidad	Sale del proceso
Gases de efecto invernadero	Kg	1,010
Aluminio	Kg	185
Vidrio	Kg	680
Plástico (EVA)	Kg	1.6
Silicio	Kg	1.24
Otros metales	Kg	2
Agua	Kg	310
Tolueno	Kg	4,057

Fuente: Adaptado de (Romero Campos, 2019)

3.4.3 Degradación térmica.

Si se aplica un gradiente de temperatura, se puede descomponer la lámina de EVA, de esta forma es posible recuperar el vidrio y la célula solar. Para esto se debe introducir en un horno de alta temperatura, que trabaje a una temperatura y presión ya determinada, los módulos previamente a triturar.

Para llevar a cabo este procedimiento es necesario que el sistema cuente con un depurador de gases, puesto que como toda combustión, se libera gases en su incineración, teniendo en cuenta que la parte a eliminar es EVA, es indiscutible que los gases son contaminantes, para ello se recomienda un tratamiento previo al tratamiento térmico que permita eliminar este tipo de materiales, para luego realizar la descomposición térmica.

Un estudio realizado por Kang, Yoo, Lee, Boo y Ryu, utilizó un tratamiento térmico en un módulo de silicio con el objetivo de eliminar la capa de EVA y recuperar la célula fotovoltaica. Al comienzo del tratamiento, el EVA, hinchado previamente como consecuencia del uso de disolventes químicos, comenzó a descomponerse alrededor de 350°C, teniendo lugar la descomposición completa a 520°C. Luego se elevó la temperatura a 600°C y se mantuvo durante una hora, lo que supuso la eliminación por completo del EVA residual y la obtención de la célula. Añadir que, durante todo el proceso, se mantuvo la atmósfera bajo un gas inerte, como puede ser el gas argón, lo cual evitó la carbonización del EVA. (Escuela Moreno, 2021).

Tabla 3.3 Recuperación de materiales en un proceso con degradación térmica.

Concepto	Unidad	Sale del proceso
Gases de efecto invernadero	Kg	1,010
Aluminio	Kg	185
Vidrio	Kg	680
Plástico (EVA)	Kg	1.6
Silicio	Kg	1.24
Otros metales	Kg	2
Agua	Kg	310

Fuente: Adaptado de (Romero Campos, 2019)

3.4.4 Proceso de tratamiento para el vidrio.

Cuando un panel llega al fin de su vida útil o está degradado lo suficiente, tal que se vea demostrado en los dos momentos óptimos de reutilización y reciclaje medioambiental y en el económico, de este se puede extraer el vidrio que contiene en fragmentos que serán triturados hasta un diámetro específico, para luego mediante tamizado y por medio de separación neumática, remover las partículas de polvo que se generan en el triturado.

Otra forma de remover las partículas de polvo restantes es por medio de un lavado y la aplicación de agitación y luego decantación, de esta forma se asegura que el compuesto resultante sea únicamente el vidrio, el cual luego de pasar por un proceso de secado, se envía a un horno para terminar el tratamiento.

3.4.5 Proceso de tratamiento para el aluminio.

Es necesario reducir el tamaño de partícula de aluminio como en el caso del vidrio, por lo que el primer proceso es un triturado donde el aluminio se reduce a pequeñas dimensiones, posteriormente por medio de un proceso de fusión, se funden las partes trituradas, donde se separan las impurezas que aún están presentes, mediante un proceso de desgasificación que consiste en inyectar un gas inerte, ya que este eleva las impurezas a la superficie de la masa fundida lo que facilita la retención final mediante un proceso de filtración, finalmente la fracción de metal extraída se cuela en lingotes o placas, y este es un metal apto para la producción de nuevos artículos de aluminio.

3.4.6 Proceso de tratamiento para las células.

Los procedimientos de reciclaje en cuanto a células fotovoltaicas se refieren, puede variar según la tecnología de construcción utilizado en las mismas, el reciclaje de células de silicio monocristalino y policristalino en los últimos años ha presentado ser influenciado por los problemas de disponibilidad del grado de silicio requerido en las células fotovoltaicas, así como por el elevado coste derivado de la producción del mismo. Por lo que, el objetivo en el reciclaje de este tipo de células ha sido la reutilización de las obleas existentes, lo que genera un ahorro tanto energético como de materia prima para los fabricantes.

En un estudio realizado por Kang, Yoo, Lee, Boo y Ryu, se observó que, al emplear una disolución de ácido nítrico, se requería un tiempo prolongado para lograr una alta descomposición del EVA, debido a la difícil penetración del ácido nítrico a través del módulo. No obstante, incrementando la temperatura de la disolución se podía acelerar el proceso a unas 7-14 horas. (Escuela Moreno, 2021)

Empleando este tratamiento, se puede recuperar la célula de silicio y el vidrio templado, sin embargo, aún quedan restos de EVA sobre la superficie de la célula.

3.4.7 Proceso de tratamiento para los polímeros.

En todos los paneles es necesaria una capa que sirva como protección para las células, de los factores atmosféricos como pueden ser, la humedad, lluvia, granizo o daños mecánicos que pueda generar la manipulación del panel. Esta capa también tiene como función aislar las células de las conexiones eléctricas del exterior.

Para los módulos de silicio, inicialmente debe desmontarse el panel, de forma que el marco de aluminio quede separado y de esta forma proceder a la eliminación de la capa de EVA a fin de separar el vidrio de la célula. Para eliminar la capa de EVA existen varios métodos, por mencionar la disolución utilizando ácido nítrico o la descomposición térmica mediante una pirolisis.

Luego de una pirolisis aparecen residuos en forma de ceniza y para el caso de tratamiento de polímeros también existen este tipo de residuos, los que deben ser gestionados de manera correcta ya que podrían contener material valioso que no pudo ser separado, como puede ser la plata u otro tipo de mineral, siempre teniendo en cuenta que estos deben manejarse como residuos peligrosos y debe recibir un tratamiento específico.

3.5 Aspectos e impactos ambientales

Los aspectos ambientales son elementos asociados a las actividades de la organización (empresa) que interactúan con el ambiente y causa o pueden causar (riesgo) un impacto ambiental, el cual puede o no, ser significativo. ISO14001

Los impactos ambientales son cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o benéfico, resultado total o parcial de las actividades de la organización. ISO 14001

Pasos para la identificación de aspectos e impactos ambientales:

- a)** Proceso, producto o servicio: conocer y realizar una breve descripción por etapas y/o procesos.
- b)** Diagrama de flujo.
- c)** Aspecto ambiental.
- d)** Impacto ambiental.

De manera general en ambos casos se tiene un uso muy significativo de energía eléctrica de la cual ambos caminos de reciclaje a tomar son sumamente dependientes. Desde el transporte necesario para la recolección se comienza a ver agotamiento de recursos naturales equivalentes a emisiones de CO₂. Para el proceso de recuperación de metales aumenta la toxicidad debido al uso de tolueno y para el proceso químico aplica el mismo criterio por el uso de diclorobenceno. (Romero Campos, 2019).

Tabla 3.4 Aspectos e impactos ambientales en el reciclaje de paneles solares.

Método	Proceso	Aspecto	Impacto
Triturado (Mecánico)	Tamizado.	Vibraciones, ruido y posible generación de residuos.	Perturbación de ecosistemas y entorno ambiental, daños a la salud humana, contaminación de suelos.
	Separación por aire.	Emisiones de contaminantes al aire.	Disposición de partículas, Degradación de la calidad de aire.
	Flotado.	Vertido de agua residual.	Contaminación de agua, agotamiento de recursos naturales.
	Separación electrostática.	Uso de recursos no renovables.	Agotamiento de recursos no renovables.
Sin triturar (Térmico)	Agua a presión	Ahorro de agua, vertido de agua residual.	Aprovechamiento de recursos naturales, contaminación de agua.
	Abrasión mecánica	Contaminación acústica	Perturbación de ecosistemas y entorno ambiental, daños a la salud humana.
	Tratamiento químico	Emisiones de contaminantes al aire.	Contaminación de aire, Degradación de la calidad de aire.

Continúa...

Tabla 3.4 Aspectos e impactos ambientales en el reciclaje de paneles solares (continuación).

Método	Proceso	Aspecto	Impacto
	Degradación térmica en horno de alta temperatura.	Termo contaminación.	Efecto negativo sobre en el entorno ambiental.

Tabla 3.5 Comparación de impactos ambientales causados por el reciclaje.

Ítem	Método Mecánico	Método Químico	Método Térmico
Cambio climático(Kg CO₂)	-361.44	-2,798.43	-3,145.7
Acidificación terrestre (Kg SO₂)	-8.8	-14.25	-14.1
Agujero en la capa de ozono (Kg CFC)	4.10E-07	3.44E-08	3.40E-08
Agotamiento de energía fósil (Kg Oil)	-131.9	-997.75	-1,037.6
Toxicidad humana (Kg 1,4 DB)	-89.9	230.9	-149.6

Fuente: Adaptado de (Romero Campos, 2019).

Como resumen general, se puede ver que cada uno de estos modelos tiene ventajas e inconvenientes. Con respecto al método mecánico, su mayor dependencia a la red eléctrica lo hace ser más débil desde el punto de vista de la generación de CO₂. Por otro lado, el método químico por su obvio uso de químicos, tiende a provocar una mayor toxicidad humana. (Romero Campos, 2019).

3.6 Estimación de recuperación en El Salvador

Paneles solares por departamento según SIGET Tipo de generador: Unit Power Resources o por sus siglas UPR para tecnología solar fotovoltaica.

Tabla 3.6 Capacidad instalada por departamento.

Departamento	Capacidad instalada	Departamento	Capacidad instalada
Ahuachapán	3 proyectos 0.074MW	Morazán	8 proyectos 0.039 MW
Cabañas	2 proyectos 5.925MW	San Miguel	42 proyectos 2.11 MW
Chalatenango	6 proyectos 0.078MW	San Salvador	109 proyectos 2.294 MW
Cuscatlán	4 proyectos 0.04MW	San Vicente	6 proyectos 0.041 MW
La Libertad	129 proyectos 13.3719 MW	Santa Ana	27 proyectos 4.913 MW
La Paz	13 proyectos 0.0314 MW	Sonsonate	14 proyectos 1.325 MW
La Unión	7 proyectos 0.027 MW	Usulután	3 proyectos 0.016 MW

Fuente: Adaptado de (SIGET, 2021).

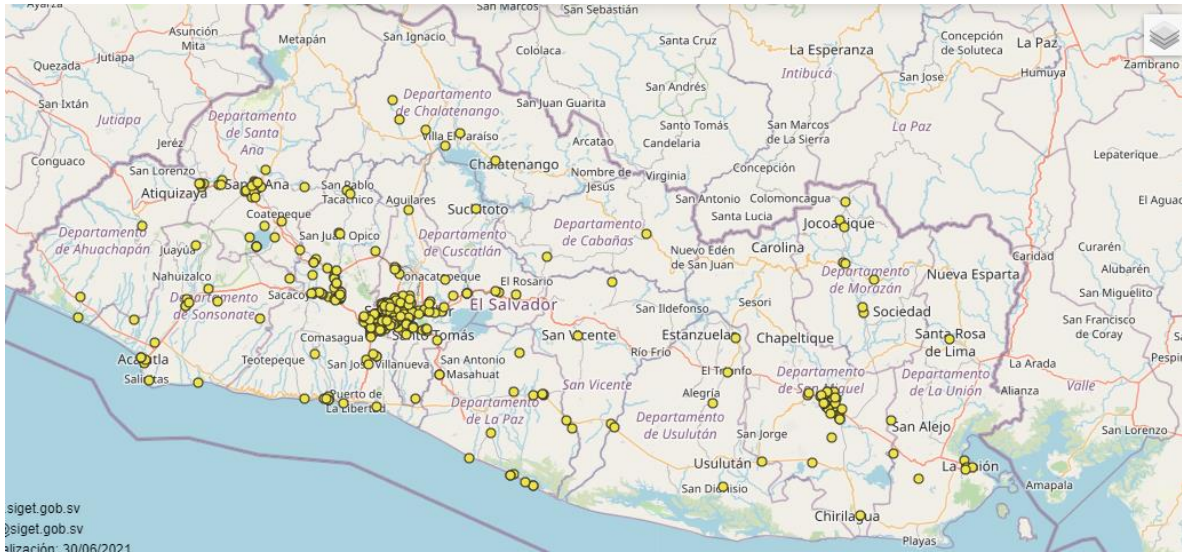


Figura 3.2 Proyectos de tecnología solar fotovoltaica. (SIGET, 2021)

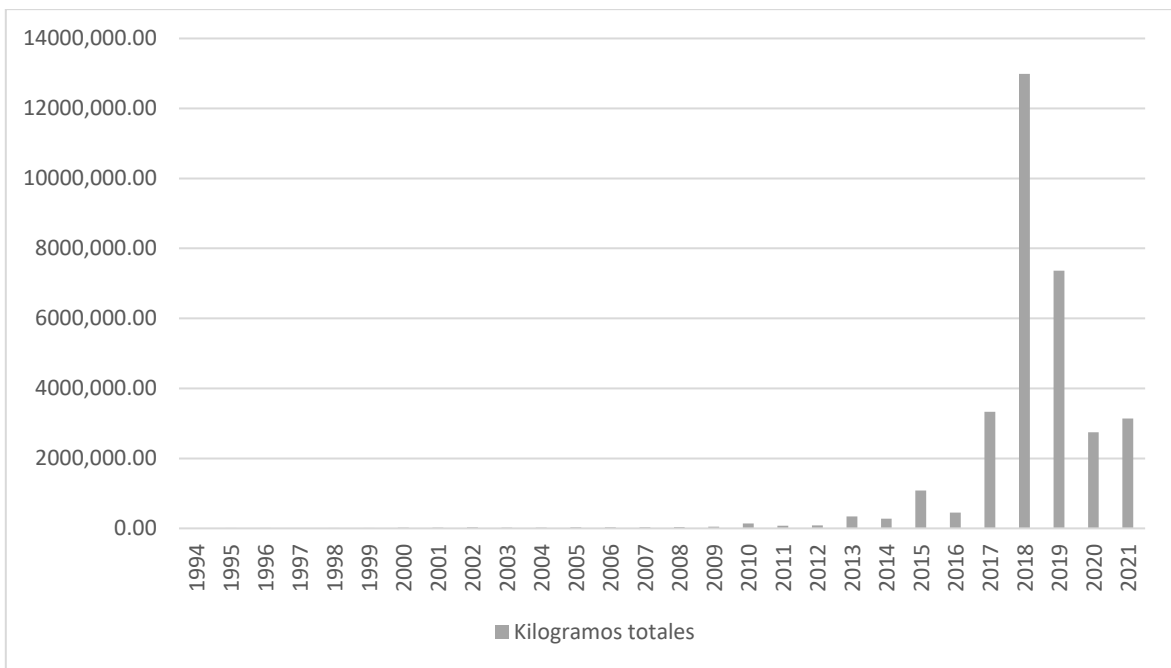


Figura 3.3 Importación anual de paneles solares a El Salvador. Adaptado de (BCR, 2022)

Tabla 3.7 Importación anual de paneles solares a El Salvador

Año	VALOR TOTAL CIF US\$	Kilogramos totales
1994	83,635.10	3,089.00
1995	198,157.01	10,660.80
1996	176,359.43	13,129.25
1997	197,337.83	7,035.47
1998	237,108.22	12,472.85
1999	377,312.75	12,155.00
2000	354,302.53	21,291.12
2001	379,156.91	23,504.12
2002	463,431.50	29,049.01
2003	497,510.96	20,980.41
2004	414,016.65	23,788.99
2005	719,817.40	28,777.94
2006	691,045.57	32,242.09
2007	1,030,301.59	30,830.31
2008	1,006,306.24	40,806.46
2009	948,122.34	46,188.44
2010	1,689,543.03	139,085.08
2011	1,435,040.88	73,343.49
2012	1,208,182.49	86,690.34
2013	4,427,137.85	343,046.60
2014	3,152,823.35	277,401.28
2015	8,850,721.75	1,082,238.85
2016	3,634,126.82	453,578.77
2017	16,307,041.05	3,333,966.78
2018	63,539,442.47	12,990,451.33
2019	32,628,531.42	7,359,747.84
2020	11,472,536.43	2,743,835.90
2021	14,234,829.59	3,139,059.91
Total	170,353,879.16	32,378,447.43

Fuente: Adaptado de (BCR, 2022)

La tabla anterior muestra el valor de las importaciones de paneles solares a El Salvador, mostrando entonces que en el país habrá un total de 32,378,447.43 Kg de desechos que provienen de tecnología fotovoltaica por lo que se retoma la información de recuperación de materiales para generar la siguiente tabla.

Tabla 3.8 Recuperación de desechos aplicando reciclaje.

Material recuperado	Kg
Aluminio	5,990,012.79
Vidrio	22,017,344.29
Pastico (EVA)	51,805.52
Silicio	40,149.27
Otros Metales	64,756.89

Si se aplica cualquiera de los métodos de reciclaje expuestos al total de residuos que se generarán, es posible extraer una gran cantidad de materiales, puesto que se recuperaría aproximadamente 28 Millones de Kg, por lo que un aproximado de 4.2 millones de Kg significaría desechos luego del proceso, cantidades que podrían variar pero es una buena estimación para demostrar que en el país es viable la aplicación de estas tecnologías, lo que se puede demostrar con una prueba piloto sobre residuos fotovoltaicos.

CONCLUSIONES

1. Con la información y los datos recopilados a lo largo de esta investigación, se pudo identificar los conceptos más relevantes y las generalidades más importantes como es el momento óptimo de reutilización y reciclaje, el cual determina si el panel es apto para seguir en curso su funcionalidad o si al momento el reciclaje aporta mayores beneficios medioambientales y económicos, estos conceptos son útiles para poder poner en práctica en El Salvador, puesto que aún no se ha establecido una gestión para este tipo de residuos y los cuales claramente serán generados.
2. Es innegable el hecho que estos equipos llegaran a finalizar su vida útil y será necesario brindarles un proceso de disposición, para lo que se plantea que este proceso sea el reciclaje donde cabe destacar que en los aspectos e impactos ambientales apreciados, existe una notable diferencia entre los impactos generados por el reciclaje y los impactos generados por la disposición inadecuada de los paneles, lo que brinda una clara ventaja y una vía de acceso a la implementación de estas metodologías en El Salvador tomando como referencia a los países que están ya poniendo en práctica el reciclaje de esta forma avanzar y mantener la imagen medio ambiental y de energías renovables que el país mantiene.
3. Con base a los resultados expuestos se concluye que se deben potenciar la optimización de los procesos estudiados e incentivar la investigación de nuevos procesos de reciclaje ya que en El Salvador hay potencial para las energías renovables, pero no se cuentan con planes de acción para cuando estas tecnologías lleguen a un momento en donde su utilidad pueda verse comprometida por el desgaste natural que conlleva la vida útil de cada panel solar y de presentarse una degradación masiva, el panel perdería valor de reciclaje y en cambio se obtendría mayores impactos ambientales.
4. Como se puede observar en la comparativa de métodos, el método térmico tiene una ligera ventaja sobre el método mecánico por su menor dependencia a la red eléctrica

y reforzada por el indicador que refleja menor impacto climático, además de un menor agotamiento de energías no renovables como claramente es el gasto de combustible fósil, sin embargo las propuestas deben ser estudiadas a profundidad y llevadas a cabo para obtener valores exactos pues los costos y la eficiencia podrían variar de manera significativa, pero para una primera instancia los aspectos e impactos ambientales son un indicador que demuestra una clara ventaja en la comparativa de métodos.

RECOMENDACIONES

1. Según los resultados expuestos, puesto que en El Salvador no se cuenta con toda la disponibilidad de los paneles existentes ya que es necesario optar por las mejores opciones en calidad-precio, debería centrarse en investigar los métodos térmicos y químicos a pequeña escala como la opción a pequeño y mediano plazo para llevar a cabo la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos.
2. Se propone como trabajo posterior el incluir la capacidad que poseen estos métodos y realizar un análisis de ciclo de vida en las condiciones a las que se exponen los paneles en el país y un análisis económico para obtener mejores resultados tomando como base las soluciones que los países que están a la vanguardia le den a la problemática.
3. Según los datos de la investigación, se propone una investigación en el área de políticas públicas y gestión para determinar qué tan provechoso como sociedad puede llegar a ser el enfoque propuesto de reciclar paneles solares.
4. Comenzar a implementar espacios de almacenamiento para las celdas en desuso y gestionar espacios de almacenamiento para disposición final de este tipo de desecho.

BIBLIOGRAFÍA

- BCR. (2022). *Importación de paneles solares*. San Salvador, El Salvador: Banco Central de Reserva.
- CEPAL. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago, Chile: Naciones Unidas.
- CNE. (2021, Septiembre 14). *Consejo Nacional de Energía*. San Salvador, El Salvador, Obtenido de Sistema Nacional de Energía: <http://estadisticas.cne.gob.sv/>
- Escuela Moreno, C. (2021). *ESTUDIO SOBRE LAS POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS*. San Cristóbal de La Laguna, España: Universidad de la Laguna.
- Gómez Escorial, T. (2017). *Diseño de un prototipo de soporte mecánico para la realización de medidas de Electroluminiscencia en plantas*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- NIST. (2016). *Energy and Economic Implications of Solar Photovoltaic Performance Degradation*. Maryland, Estados Unidos: U.S. Department of Commerce.
- Reguera Gil, F. J. (2015). *ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS*. Sevilla, España: Universidad Internacional de Andalucía.
- Romero Campos, J. C. (2019). *ANÁLISIS CICLO VIDA Y ECONÓMICO APLICADO A LA REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS*. Santiago de Chile.: Universidad de Chile.
- Ruiz Escudero, M. (s. f.). *Una mirada al futuro del reciclaje de paneles fotovoltaicos en España*. Madrid, España: Instituto de Energía Solar, Universidad Politecnica de Madrid.

SIGET. (2021, Septiembre 14). *Super Itendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones*. Obtenido de Mercado Electrico de El Salvador 2020:

<https://www.siget.gob.sv/wp-content/uploads/2021/05/Mercado-Elctrico-de-El-Salvador-2020-2.pdf>

UGB. (2021, Septiembre 14). *Energías Renovables*. Obtenido de Sistemas Fotovoltaicos:

<https://sfv.ugb.edu.sv/sistemas-fotovoltaicos.php>