



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ingeniería,  
Ciencia y Tecnología

# **SEGUNDA VIDA, UNA MIRADA HOLÍSTICA AL RECICLAJE DE PANELES SOLARES EN PROYECTOS A GRAN ESCALA**

Presentado para obtener el título de

**MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Claudia Liliana Montes Montoya

Dirección:

David Felipe Celeita Rodríguez

María Fernanda Gómez Galindo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a varias personas que me apoyaron durante el proceso:

En primer Lugar, al Dr. David Felipe Celeita por su mentoría y liderazgo, fue un director excepcional, con un don de ayuda realmente genuino, sus comentarios, paciencia y sugerencias constructivas hicieron que disfrutara mucho este proceso, su amplio conocimiento, ideas y experiencia en el campo de las energías renovables fueron de gran ayuda para que pudiera comprender mucho más el tema.

Quiero agradecer al CRAI de la universidad del Rosario quienes de manera muy desinteresada me proporcionaron recursos y asesorías para desarrollar mi investigación y adquirir una comprensión a detalle del campo de las energías renovables y puntualmente en el reciclaje de paneles solares.

También quiero agradecer a la Dra. María Fernanda Gómez, directora de la maestría en energías renovables, por sus correcciones y sugerencias que fueron un gran aporte para mejorar el documento y alcanzar los estándares exigidos en la entrega.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, especialmente a mi esposo quien mientras yo estaba fuera de casa recibiendo clase, él estaba en casa cuidando de nuestro hijo; sin él esto no hubiera podido ser posible.

## RESUMEN

En la actualidad la presencia de dispositivos electrónicos en la vida cotidiana ha experimentado un notable aumento. Elementos como computadoras, teléfonos celulares, televisores, entre otros, forman parte fundamental de nuestro día a día. No obstante, al llegar al final de su ciclo de vida útil, estos dispositivos se convierten en lo que se conoce como chatarra electrónica o basura tecnológica. Esta situación no solo se limita únicamente a los dispositivos mencionados, sino que también abarca los paneles solares por sus elementos constructivos y los materiales de las celdas que en esencia se componen por semiconductores.

El uso de la energía solar ha experimentado un crecimiento importante en todo el mundo, y Colombia no es una excepción. Desde hace varios años se han estado desarrollando proyectos solares en el país y en los últimos 3 años el crecimiento ha sido exponencial. Esto se debe, en gran medida, a que la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) ha avalado la incorporación de las energías renovables al sistema de transmisión nacional (STN).

Sin embargo, se ha identificado que en Colombia no existe una regulación específica para el reciclaje de paneles solares lo que ha llevado a que este proceso no esté desarrollado en el país. A pesar de que los paneles solares tienen una vida útil de alrededor de 25 años, su desecho puede ser dañino para el medio ambiente debido a la presencia de materiales tóxicos. Se estima que existen alrededor de 39630 paneles solares en el país (cifra en el año 2021) y se espera que este número aumente considerablemente en los próximos años.

Este proyecto contribuye con una revisión y análisis exhaustivo de la situación actual del reciclaje de paneles solares en el país. Además, se pretende proponer un modelo de economía circular y evaluar su viabilidad presupuestal y determinar el costo de implementar una planta de reciclaje en Colombia.

## **ABSTRACT**

Nowadays, the pervasive presence of electronic devices in daily life has witnessed a remarkable surge, with computers, cell phones, and televisions becoming integral components of our routines. However, as these devices reach the end of their lifecycle, they transform into electronic waste or technological junk. This issue extends beyond conventional devices to encompass solar panels, recognized for their structural elements and semiconductor-based cell materials.

Colombia, like the rest of the world, has experienced a substantial growth in solar energy utilization. Over the past few years, the country has witnessed an exponential increase in solar projects, partly attributed to the endorsement of renewable energies into the national transmission system by the Mining and Energy Planning Unit (UPME).

Despite this surge in solar energy adoption, it has been observed that Colombia lacks specific regulations for solar panel recycling, resulting in an underdeveloped recycling process in the country. While solar panels typically have a lifespan of approximately 25 years, their disposal can pose environmental hazards due to the presence of toxic materials. With an estimated 39,630 solar panels in the country as of 2021, this number is expected to escalate significantly in the coming years.

This project aims to contribute to the field by conducting a thorough examination and analysis of the current state of solar panel recycling in Colombia. Additionally, it seeks to propose a circular economy model, assess its budgetary feasibility, and determine the costs associated with establishing a recycling plant in Colombia. By addressing the growing issue of solar panel waste management, this research endeavors to provide valuable insights for sustainable and environmentally responsible practices in the burgeoning solar energy sector of the country.

## TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TABLA DE CONTENIDO.....	v
Índices de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Grafica.....	viii
I. CAPÍTULO 1 .....	1
a) <i>Introducción</i> .....	1
II. CAPÍTULO 2 .....	3
a) <i>Objetivos</i> .....	3
<b>2.1 Objetivo general</b> .....	3
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	3
III. CAPÍTULO 3 .....	4
a) <i>Justificación y descripción del problema</i> .....	4
b) <i>Descripción del problema</i> .....	5
IV. CAPITULO 4 .....	7
a) <i>Marco teórico y estado del arte</i> .....	7
<b>4.1 Marco Teórico</b> .....	7
<b>4.2 Estado del arte</b> .....	9
V. CAPÍTULO 5 .....	15
a) <i>Metodología propuesta</i> .....	15
VI. CAPÍTULO 6.....	17
a) <i>Resultados</i> .....	17
<b>6.1 Características principales de los paneles solares comerciales</b> .....	17
<b>6.2 capacidad instalada en Colombia y evaluación económica de la remuneración del reciclaje de los paneles solares de los proyectos instalados hasta 2023 en el largo plazo.</b> ....	18
<b>6.3 Instalación, montaje y operación de una planta de reciclaje de Paneles solares</b> .....	18
6.4 <i>Desarrollo objetivo general</i> .....	28
<b>6.3.1 Paso a paso: Desarrollo de la Macro</b> .....	31
VII. CAPÍTULO 7.....	37
a) <i>Conclusiones y recomendaciones</i> .....	37
BIBLIOGRAFÍA .....	39

## Índices de Tablas

Tabla 1,Corresponde a las características y usos de los componentes principales de los paneles solares... 8	
Tabla 2 corresponde a la comparación entre 2 procesos diferentes de reciclaje de paneles solares [31] .....	20
Tabla 3 corresponde a los componentes y cantidades de una planta de reciclaje de paneles solares .....	25
Tabla 4 corresponde a los departamentos de Colombia con la cantidad de parques solares a gran escala radicados en UPME a 2023 .....	28

## Índice de Figuras

Figura 1 Pirámide de la economía circular [21] .....	10
Figura 2 Corresponde al diagrama mariposa visualizando la economía circular. [16].....	11
Figura 3 corresponde al diagrama de flujo para desarrollar una macro que muestre un modelo de economía circular.....	16
Figura 4 corresponde a las diferentes células solares más usadas .....	17
Figura 5 La figura muestra los dos procesos más representativos de reciclaje de paneles solares que existen en la actualidad[36] .....	20
Figura 6 , corresponde a un modelo de separador automático para marcos[37] .....	21
Figura 7, corresponde a un modelo de una cortadora de línea completa con banco[37].....	21
Figura 8 corresponde a un modelo de delaminador de vidrio solar [37].....	22
Figura 9 corresponde a un modelo de Cinta transportadora para descarga de vidrio[37] .....	23
Figura 10 corresponde a un modelo de cinta transportadora para para carga de los paneles delaminados en triturador [37] .....	23
Figura 11 Corresponde a un modelo de triturador mono eje con empujador hidráulico[37] .....	24
Figura 12 corresponde a un modelo de turbina multisector [37].....	24
Figura 13, corresponde a un modelo de sistema de cribado de 3 estados[37].....	25
Figura 14, corresponde a un modelo de tablero eléctrico [37] .....	25
Figura 15 corresponde al mapa de Colombia referenciando la cantidad de parques solares por departamento .....	27
Figura 16: corresponde al encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro. ....	29
Figura 17 corresponde al encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando la columna de cantidad de paneles.....	29
Figura 18 corresponde al encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas de peso del vidrio [Kg], Peso del silicio Kg y peso del aluminio en Kg.....	30
Figura 19: corresponde al encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas precio del vidrio [\$], precio del silicio [\$], precio del aluminio en [\$] y con la suma de todos los anteriores se procede a .....	31
Figura 20 corresponde al encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas valor en Euros [€] y Valor en dólares [\$] .....	31
Figura 21 corresponde al entorno gráfico de la macro .....	31
Figura 22 : corresponde al resultado que entrega la macro cuando se le ingresa un parque solar que tiene registrado en su base después de oprimir el botón “BUSCAR” y el botón “TODOS” .....	33
Figura 23: corresponde a la información que entrega el PDF 1 .....	33
Figura 24 : corresponde al resultado que entrega la macro cuando se le ingresa un parque solar que tiene registrado en su base después de oprimir el botón “BUSCAR” y el botón “TODOS” .....	36

## Índice de Grafica

Grafica 1 corresponde a la curva P-V del análisis comparativo entre módulos reciclados, nuevos y usados [23] .....	13
Grafica 2 corresponde a la curva V-I del análisis comparativo entre módulos reciclados, nuevos y usados [23] .....	13
Grafica 3 corresponde a la capacidad de generación de energía eléctrica instalada en Colombia [4] .....	18
Grafica 4: corresponde a la información que entrega el PDF 2 .....	34
Grafica 5: corresponde a la información que entrega el PDF 3 .....	35
Grafica 6: corresponde a la información que entrega el PDF 4 .....	36

## **I. CAPÍTULO 1**

### *a) Introducción*

La economía circular permite aprovechar los recursos para darles otra vida y devolverlos al mercado con una forma nueva. Este innovador modelo, aboga por los materiales biodegradables y que la fabricación de los productos sea lo menos invasiva posible, con el fin de que no contaminen. El objetivo final es que, cuando haya que desecharlos porque no se puedan reutilizar, se reciclen de una manera respetuosa con el medioambiente [1].

Es por ello que el objetivo de las empresas que hacen de la economía circular su bandera es: luchar contra el calentamiento global y el cambio climático, reducir la dependencia de las materias primas a favor de los productos reutilizados y producir la menor cantidad posible de desechos. Para conseguirlo hay que aplicar nuevas estrategias empresariales, pensar el modelo de negocio, establecer políticas de ahorro de energía, reciclar y evitar la contaminación, entre otras medidas [1].

En este sentido, las empresas colombianas han adoptado modelos ágiles para gestión de sus trabajos enmarcados en metodologías Scrum, Lego, entre otras; Dentro del desarrollo de los proyectos con la implantación de los sistemas Agile, uno de los puntos más importantes que es la necesidad de pensar en global, en la visión de un todo, antes de actuar en lo particular [2], además de querer ser innovadoras y marcar la diferencia para tener un valor agregado en sus productos o servicios y ser innovadoras.

De acuerdo a, la ley 2099 de 2021 por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético y la reactivación económica del país [3], ha impulsado el ingreso de energías de FNCER, así como la subasta que se realizó el 15 de febrero de 2024 donde se asignaron 156,2 GWh/día que suman a las 88,3 GWh/día asignadas previamente, para un total de 244,4 GWh/día, en total la asignación de esta energía fue para 80 plantas de las cuales 30 son solares [4], es decir, para 2027 se espera que las FNCER aumenten su participación en la matriz energética del 3% al 26%, esto ha convertido a Colombia en un país muy atractivo para la inversión en energías renovables especialmente la energía solar.

Por lo anteriormente expuesto, con este proyecto se pretende generar un modelo de economía circular para que muchas empresas enmarcadas en la ley 2099 de 2021 que estén invirtiendo en parques solares, que sean innovadoras y que además estén pensando a futuro cuando deban desmantelar el proyecto, puedan hacer el cálculo del valor que pueden obtener adicional al

desmontar el proyecto, este valor sale de la venta del silicio, vidrio y aluminio, que son los principales componentes de los paneles solares; también se pretende generar conciencia del problema que se avecina ya que se está haciendo el montaje de muchos parques solares pero el país no está preparado para el desmontaje y el reciclaje del mismo

## II. CAPÍTULO 2

### a) *Objetivos*

#### *2.1 Objetivo general*

Proponer un modelo de economía circular para reciclar los paneles solares de proyectos a gran escala radicados en UPME hasta 2023

#### *2.2 Objetivos específicos*

- Investigar para los tipos de paneles solares más usados que se comercializan a 2023 sus componentes, para que se usen, en que proporción se pueden reutilizar al finalizar la vida útil del panel solar y que empresas podrían ser candidatas a la comercialización o consumo de los componentes reciclados
- Conocer la capacidad instalada en Colombia y evaluar económicamente la remuneración del reciclaje de los paneles solares de los proyectos instalados hasta 2023 en el largo plazo.
- Calcular económicamente el valor de la instalación, montaje y operación de una planta de reciclaje de paneles solares en Colombia.

### III. CAPÍTULO 3

#### a) *Justificación y descripción del problema*

Dada la contaminación ambiental y la escasez de energía, en muchos países necesitan implementar energías limpias y renovables. La generación con energía fotovoltaica se considera una de las tecnologías con más protección ambiental y más prometedora dado el uso del recurso solar, además la producción de energía con paneles solares no genera ruido, no contamina con ningún tipo de gas, no se utilizan grandes cantidades de materiales para su producción; el único inconveniente es su disposición final [5].

En este sentido, la realización de este proyecto es importante debido a la creciente adopción de energías renovables en todo el mundo y particularmente en Colombia donde se asimila la necesidad de desarrollar un sistema de reciclaje eficiente y sostenible para los paneles solares. Actualmente en nuestro país el proceso de reciclaje no está regulado, lo que ha llevado a que este proceso no tenga un desarrollo significativo. Además, la falta de empresas dedicadas al reciclaje de paneles solares y la presencia de materiales tóxicos en estos componentes hacen que su desecho sea un problema ambiental que debe ser abordado [6].

Es así que, la implementación de un sistema de reciclaje de paneles solares en Colombia no solo contribuiría a la protección del medio ambiente, sino que también permitiría la recuperación de materiales valiosos presentes en los paneles solares, como el silicio, vidrio y metales, estos materiales podrían ser utilizados en la producción de nuevos paneles solares, o de otros componentes como diodos, transistores o circuitos integrados, reduciendo la necesidad de materiales nuevos y disminuyendo el impacto ambiental asociado con su extracción y producción. Además, el reciclaje de paneles solares podría representar nuevas oportunidades de empleo y promover el crecimiento económico y sostenible en Colombia [7].

Dentro de este orden de ideas, otro de los usos de los paneles fotovoltaicos al final de su ciclo de vida es en composites de cemento. La atención se centra en las propiedades del composite de cemento tras la sustitución del 100% del árido natural por vidrio reciclado procedente de paneles fotovoltaicos, La sustitución parcial del relleno de piedra caliza por polvo de vidrio y escoria granular de alto horno mejora la resistencia mecánica del hormigón [8], en Colombia una empresa que tiene un alto potencial en este uso es Celsia ya que le están apostando fuertemente al montaje de parques solares y además pertenecen a grupo argos que son los más fuertes en el negocio del cemento en el país.

Cabe considera, por otra parte, este proyecto también podría ayudar a identificar los desafíos y las oportunidades asociadas con el reciclaje de paneles solares en el país. Esto permitiría a los gobiernos y empresas desarrollar políticas y estrategias efectivas para fomentar el reciclaje de paneles solares y abordar los problemas ambientales y económicos asociados con el desecho. Además, la investigación podría ayudar a identificar tecnologías y procesos innovadores.

### ***b) Descripción del problema***

Recursos como el sol y el viento son fuentes inagotables en nuestro planeta. A lo largo de la historia, los seres humanos han buscado la manera de aprovechar al máximo estos recursos y utilizarlos para innovar con nuevas tecnologías, como la energía eólica y la energía solar. El uso de estos recursos no es algo nuevo, ya que desde la antigüedad se empleaban estas tecnologías de manera pasiva. Por ejemplo, en la antigua Grecia se combinaba la arquitectura de los hogares para utilizar el sol como calefacción en invierno y como sombra en verano. En Europa, en el siglo XII, se inició el uso de molinos debido a la dificultad del acceso al agua.

En efecto, el despliegue de energía Fotovoltaica (PV) ha crecido a un ritmo sin precedentes desde principios de la década de 2000, la capacidad instalada en el mundo alcanzó los 222 gigavatios (GW) a finales de 2015 y se espera que aumente aún más a los hasta los 4500 GW en 2050 para entonces se espera que grandes países potencia del mundo como por ejemplo China tenga una capacidad instalada de 1731 GW, India 600 GW, EE. UU. 600 GW, Japón 350 GW y Alemania 110 GW. Con el aumento de la capacidad instalada también llega el aumento de residuos generados por módulos fotovoltaicos, según IRENA se espera que para el 2050 exista en residuos el equivalente al 4% de la capacidad instalada, es decir, entre 5.5 y 6 millones de toneladas de toneladas [9].

En Colombia, el sector energético ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años, gracias al uso cada vez más frecuente de paneles solares para la generación de energía limpia, Sin embargo, al final de su vida útil, los paneles solares pueden convertirse en residuos peligrosos debido a la presencia de materiales tóxicos como el plomo y el cadmio [10]. En la actualidad, la generación de residuos es un grave problema a nivel mundial. La gestión estos residuos se enfrenta a diversos desafíos, como la reducción de la huella de carbono asociada a gases de efecto invernadero, así como la contaminación de suelo, el agua y el aire. La cantidad de residuos

generada está estrechamente relacionada con el incremento al consumo, el cual a su vez se vincula con el crecimiento de la población mundial y un sistema de industrialización lineal caracterizado por una eficiencia material deficiente. La economía global todavía está en proceso de transformación hacia un sistema circular [11].

Según XM, en la subasta de energías renovables de 2021 se asignaron contratos de largo plazo de suministro de energía a 9 empresas generadoras con 11 proyectos de generación con una capacidad de 796.3 MW que corresponden a proyectos solares, los cuales firmarán contratos con 7 comercializadores de la subasta y 46 comercializadores del mecanismo complementario [12]. es decir, que aproximadamente en el año 2046 todos estos parques habrán llegado al final de su vida útil y podrán ser desmontados, sin embargo, en el momento de iniciar el proyecto no estaba regulada la disposición final de los residuos. Si no se regulariza en el transcurso de unos años, estos desechos podrían terminar en la basura, lo cual generaría un problema aun mayor al medio ambiente, lo anterior solo contando los parques que entraron a subasta, hay que tener en cuenta que hay muchos proyectos que no entraron a subasta y aun así están ya construidos o en proceso de construcción.

## IV. CAPITULO 4

### a) *Marco teórico y estado del arte*

#### *4.1 Marco Teórico*

Este proyecto debe considerar varios aspectos importantes para comprender el tema de estudio y desarrollar la investigación de manera efectiva. En primer lugar, es importante conocer las características de los paneles solares, su composición y los materiales que los conforman. Los paneles solares están compuestos principalmente de silicio, vidrio, aluminio y otros materiales como plásticos, polímeros y metales. Algunos de estos materiales son considerados tóxicos, como el plomo y el cadmio, lo que hace que el proceso de reciclaje sea importante para evitar su impacto en el medio ambiente [9].

En función de lo planteado, se debe tener en cuenta las políticas y regulaciones en otros países sobre el reciclaje de paneles solares para adaptarlas al marco regulatorio colombiano. A nivel internacional la unión europea ha establecido una legislación específica para el manejo de residuos electrónicos, incluyendo los paneles solares. En Colombia, no existe una regulación específica para el reciclaje de paneles solares, sin embargo, si existe la política nacional de RAEE de 2017, esta política recoge los principios, objetivos, componentes y acciones que estableció la ley 1672 de 2013 y considera la situación y dinámicas actuales de los RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) en Colombia y el resto del mundo.

Es por ello, en América del sur, Brasil, es un país que suscita preocupación debido a los esfuerzos infructuosos para establecer un tratamiento especial para los residuos de paneles solares. En 2022 se generaron aproximadamente 2,6 millones de toneladas de RAEE y se espera que este promedio aumente con la expansión de las energías limpias [13]. Es importante considerar el impacto ambiental del reciclaje de paneles solares y su importancia en el contexto de la transición hacia una economía más sostenible y de bajo carbono. Los paneles solares son una fuente importante de energía renovable y su reciclaje es esencial para reducir su impacto ambiental y evitar la generación de residuos peligrosos [14].

Finalmente, se deben considerar las tecnologías y procesos utilizados en el reciclaje de paneles solares, así como las tendencias y avances en esta área. En la actualidad, existen diferentes tecnologías para el reciclaje de paneles solares, incluyendo la separación mecánica y la recuperación de materiales por medio de procesos químicos. Además, se están desarrollando

nuevas tecnologías para el reciclaje de paneles solares, como el uso de láseres para separar los materiales y el uso de microorganismos para descomponer los componentes [9] **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a continuación, algunos usos de los componentes de los paneles solares:

Tabla 1, Características y usos de los componentes principales de los paneles solares

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	FORMA	USO
SILICIO	El silicio es uno de los elementos químicos cuyo símbolo es "Si" y que se encuentra en la tabla periódica en el grupo 14 o IVA. Por su abundancia (2,57 x 10 <sup>5</sup> p.p.m.) es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno (4,95 x 10 <sup>5</sup> p.p.m.) [15].		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. en la fabricación de transistores y todo tipo de dispositivos semiconductores.</li> <li>2. Hay un tipo de silicio que se usa en la preparación de siliconas, en cerámica, en fabricación de vidrio para ventanas y aislantes y esmaltados.</li> <li>3.El dióxido de silicio (arena y arcilla) es un importante constituyente del hormigón y los ladrillos y se emplea en la producción de cemento Portland.</li> <li>4.El carburo de silicio se usa en la fabricación de láseres para obtener una luz con una longitud de onda de 456 nm</li> <li>5. Es inerte y estable a altas temperaturas, lo que la hace útil en varias aplicaciones industriales, como lubricantes, adhesivos, impermeabilizantes y en aplicaciones médicas, como prótesis valvulares cardíacas e implantes de mamas</li> </ol>
VIDRIO	El cristal templado es un vidrio de seguridad, que ha sido procesado mediante tratamiento térmico para aumentar su resistencia en comparación con el vidrio ordinario. Esto se logra mediante un proceso de calentamiento y enfriamiento controlado del vidrio original para el caso del panel solar por lo general tiene un espesor de 3 a 4mm [16].		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fabricar ladrillos.</li> <li>2. Asfaltar terreno</li> <li>3. Elaborar productos cerámicos</li> <li>4. Componente que forme parte de productos de aislamiento</li> <li>5. Industria del césped artificial</li> <li>6. confección de sistemas de filtrado de agua</li> <li>7. En superficies decorativas</li> <li>8. Proceso de arenado y limpieza de distintos equipos</li> </ol>
COBRE	El cobre es un elemento químico metálico representado por el símbolo Cu (su nombre proviene del latín cuprum, a su vez proveniente del griego Kyros) y de número atómico 29, que compone junto con el oro, la plata y el roentgenio a la denominada familia del cobre de la tabla periódica[17].		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.</li> <li>2. Transporte</li> <li>3. Fabricación de monedas</li> <li>4. Construcción y ornato</li> <li>5. Aleaciones y subproductos</li> </ol>
ESTAÑO	Es un metal plateado, maleable, que no se oxida fácilmente con el aire y es resistente a la corrosión. Se encuentra en muchas aleaciones y se usa para recubrir otros metales protegiéndolos de la corrosión [15].		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se usa como revestimiento protector del cobre, del hierro y de diversos metales usados en la fabricación de latas de conserva.</li> <li>2. se usa para disminuir la fragilidad del vidrio</li> <li>3. se usa para fungicidas, tintes, dentífricos y pigmentados</li> <li>4. para hacer aleaciones de bronce y cobre</li> <li>5. en soldadura blanda</li> </ol>

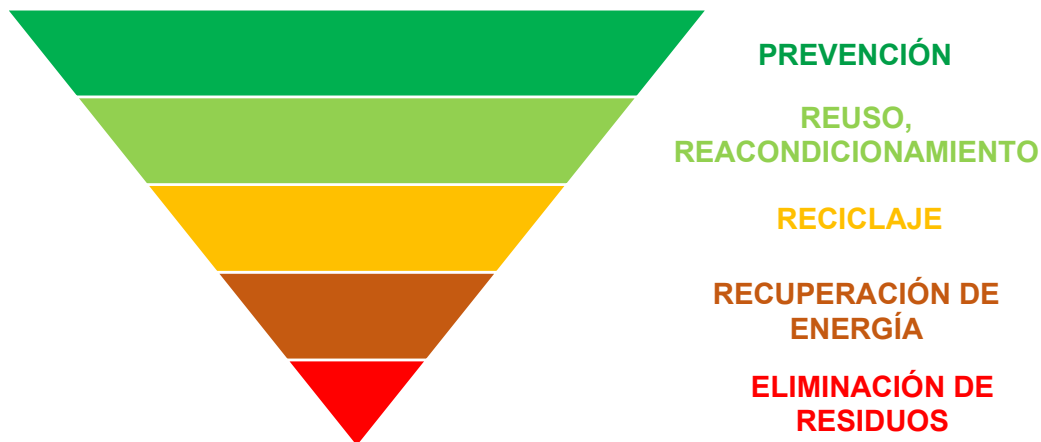
## 4.2 Estado del arte

Bajo el enfoque de un modelo de consumo y producción sostenible, vital para garantizar la subsistencia de las generaciones presentes y venideras, nuestro planeta se enfrenta a una escasez de recursos para satisfacer las demandas de recursos naturales y mantener los estilos de vida actuales.

Colombia ha priorizado la economía circular y la transición energética en sus planes nacionales de desarrollo, buscando reducir el consumo de recursos, minimizar residuos y adoptar fuentes de energía renovable para combatir el cambio climático. El actual plan, "Colombia potencia de la vida 2023-2027", destaca la formación de comunidades energéticas mediante fuentes no convencionales de energía renovable, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU y el acuerdo de París [18].

Para atenuar este desafío, es necesario transformar nuestros hábitos de consumo y priorizar medidas que promuevan la sostenibilidad. Una acción crucial en este sentido es la transición hacia sistemas de suministro energético más respetuosos con el medio ambiente. Sin embargo, resulta alarmante observar que las crisis a nivel mundial han generado un aumento en las subvenciones a los combustibles fósiles casi duplicándose entre 2020 y 2021 [19].

El tradicional modelo lineal de producción y consumo ha provocado consecuencias ambientales, sociales y económicas significativas, llevando al planeta al borde de sus límites. En el año 2021, se superó en un 74% la capacidad de carga del planeta, agotando los recursos disponibles para el año en tan solo 210 días, lo que equivale a utilizar los recursos que proporcionarían 1,75 planetas [20]. Uno de los principales beneficios de la economía circular es su capacidad para reducir la presión sobre los recursos naturales y minimizar la generación de residuos. Al adoptar prácticas como el diseño para la circularidad y la reutilización de productos, se puede reducir la extracción de materias primas y la producción de desechos, disminuyendo así la huella ecológica de las actividades humanas [21]. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La economía circular plantea nueve acciones para cumplir los objetivos 11 planteados: rechazar aquello que no se necesita, rediseñar con criterios sostenibles y diseños ecológicos, reducir el consumo, reutilizar productos en buen estado, reparar para alargar la vida de un producto, renovar un producto antiguo para modernizarlo, remanufacturar manual o mecánicamente aquello que necesitamos, reciclar la materia prima para crear nuevos productos, recuperar materiales para la generación de energía [22].



*Figura 1, Pirámide de la economía circular [23].*

El diagrama del sistema de economía circular, conocido como diagrama de mariposa, ilustra el flujo continuo de materiales en una economía circular. Hay dos ciclos principales: el ciclo técnico y el ciclo biológico. En el ciclo técnico, los productos y materiales se mantienen en circulación a través de procesos como la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. En el ciclo biológico, los nutrientes de los materiales biodegradables se devuelven a la Tierra para regenerar la naturaleza.

En este sentido, el lado izquierdo del diagrama de mariposa está el ciclo biológico, que corresponde a materiales que pueden biodegradarse y regresar de manera segura a la tierra. Este ciclo afecta principalmente a los productos que se consumen, como los alimentos. Sin embargo, algunos otros materiales biodegradables, como el algodón o la madera, pueden eventualmente pasar del ciclo técnico al ciclo biológico una vez que se hayan degradado hasta un punto en el que ya no puedan usarse para fabricar nuevos productos.

Sin embargo, en el lado derecho del diagrama de mariposa está el ciclo técnico, relevante para productos que se usan en lugar de consumirse [24].

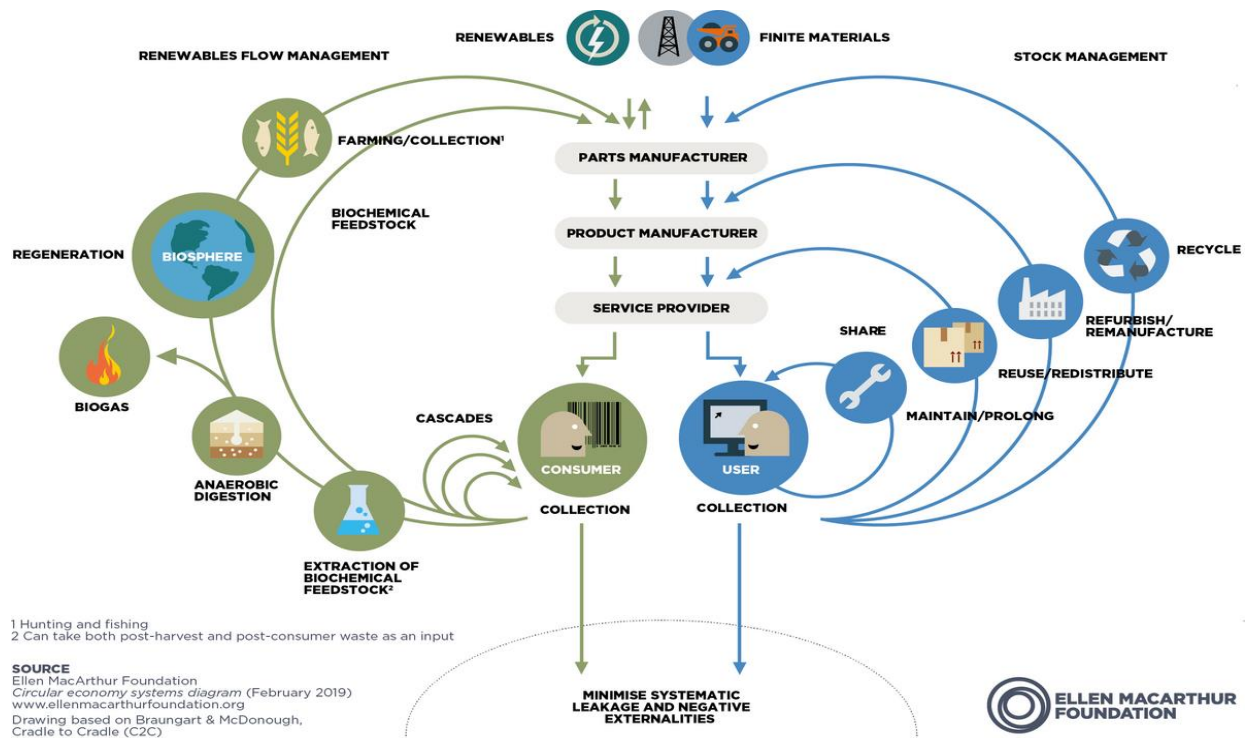


Figura 2, Diagrama mariposa visualizando la economía circular [1].

Por consiguiente, en muchos países, se están implementando políticas y programas de economía circular para garantizar un manejo sostenible del reciclaje de paneles solares al final de su vida útil o por mantenimiento. Colombia tiene la ley 1672 de 2012 donde se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), sin embargo, no se habla específicamente de paneles fotovoltaicos, como si se indican componentes particulares como las pilas y bombillos.

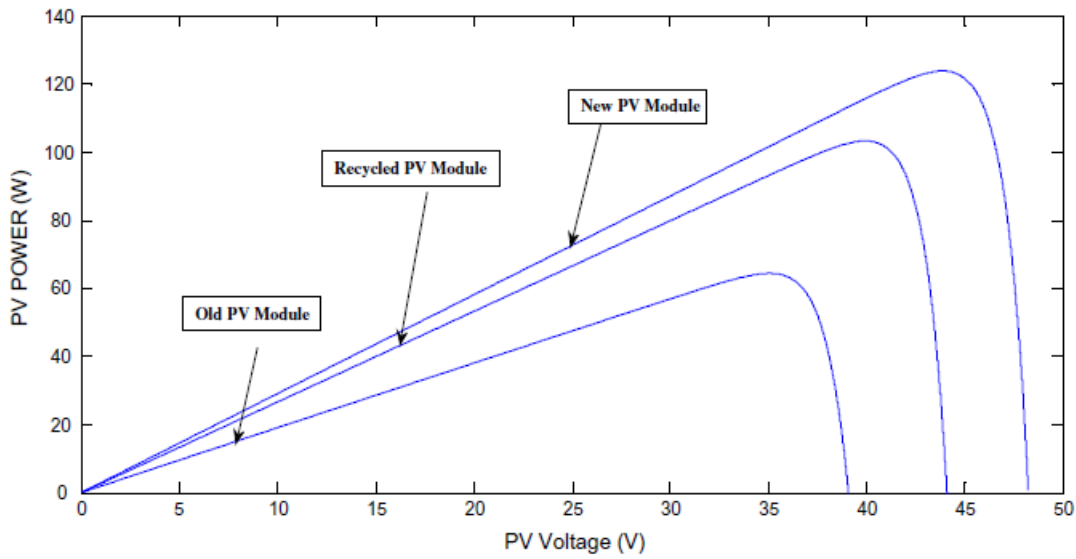
Los paneles solares vienen compuestos de vidrio, metales como cobre, plomo y estaño, las celdas son de silicio y tienen una parte en plata; todos los componentes son reciclables. Además, hay 2 métodos para separar esos componentes, uno es mecánico (el más usado) y el otro es por medio de procesos químicos, según la comisión europea el 85% de los paneles que se producen actualmente son en silicio [25].

El análisis precedente, a nivel mundial muchos productores europeos ya están empezando a reciclar los módulos fotovoltaicos, por iniciativa propia “PV Cycle”, y el Proyecto de Reglamento de la Unión Europea sobre el reciclaje de los módulos fotovoltaicos bajo el marco de “Waste Electrical and Electronic Equipment” (WEEE) [26].

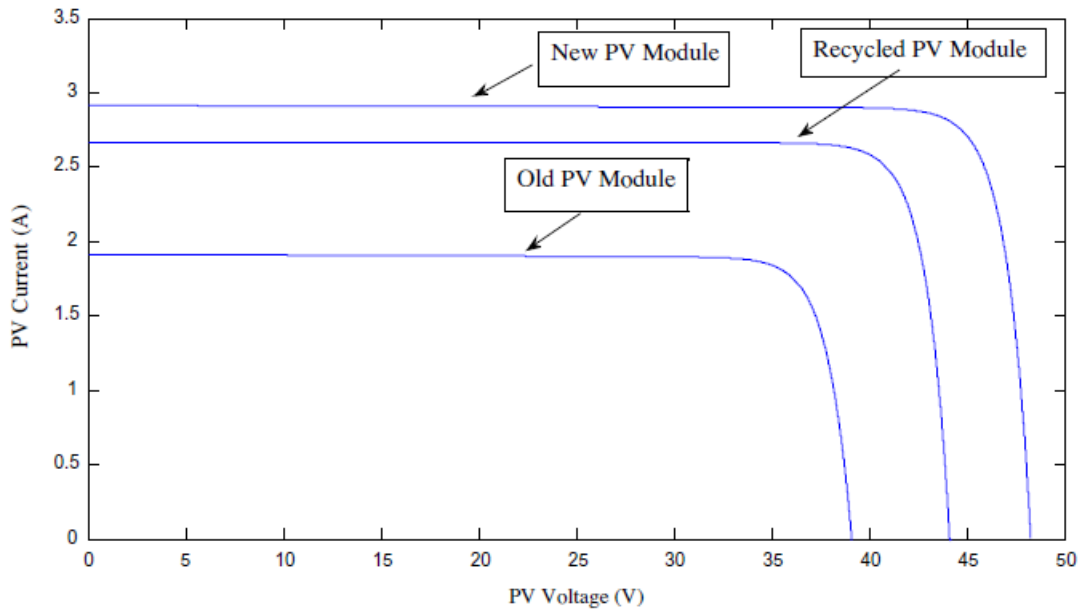
PV Cycle fue fundada en el año 2007 como una asociación sin fines de lucro, y facilita la recolección y el reciclaje de celdas solares al final de su vida útil. La Asociación Europea es financiada completamente por productores e importadores, y el servicio es gratuito para todos aquellos que quieran disponer paneles fotovoltaicos, seguido de un desmontaje, sustitución o proyecto de renovación. La asociación ayuda a recuperar materiales como el vidrio, metales, plásticos y semiconductores, los cuales pueden ser utilizados en la producción de nuevos materiales y productos [27].

Con respecto al costo de gestión de los paneles cristalinos, PV Cycle realizó una estimación según datos recogidos en el desmantelamiento de la planta belga de Chevetogne en 2009, tomando en consideración un escenario óptimo en el cual se recupera el 100% del aluminio, 95% del vidrio y el 30% de los metales raros [28] El balance neto de todo el proceso es de 1815€, costos de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio cristalino, según PV Cycle en el 2011. En términos de la industria fotovoltaica en Estados Unidos, actualmente la compañía First Solar provee soluciones de reciclaje. El proceso de reciclaje de módulos de esta empresa consiste en etapas de: recolección de los residuos, sistema de aspiración, trituradora, molino de martillos, eliminación de la película, separación sólido-líquido, precipitación, deshidratación, torta de filtro rico en metales, material de vidrio laminado, enjuague de vidrio y 13 limpieza del vidrio. El siguiente paso es la recuperación y la calidad del producto, aproximadamente un 90% del peso del módulo es recuperado, la mayoría es vidrio [29].

Un estudio de la universidad central de nueva Delhi hace un análisis comparativo entre módulos nuevos, reciclados (construidos con material reciclado de otros módulos) y módulos viejos y se llega a la conclusión que la salida (característica P-V e I-V) del módulo reciclado cumple con los estándares de calidad de los paneles fotovoltaicos actuales y sus curvas se acercan bastante a la de un módulo nuevo [30].



Gráfica 1, Curva P-V del análisis comparativo entre módulos reciclados, nuevos y usados[30].



Gráfica 2, Curva V-I del análisis comparativo entre módulos reciclados, nuevos y usados[30].

En este sentido, en china, a pesar de ser el mercado más grande del mundo de paneles fotovoltaicos, no hay ninguna política respecto a reciclaje de estos; por lo que la escala de reciclaje es pequeña. La tecnología se encuentra en investigación y desarrollo en laboratorios, y por lo tanto no se utiliza ningún equipo profesional para el reciclaje de los paneles [2].

Japón También ha desarrollado investigación en el reciclaje de módulos fotovoltaicos, y su objetivo es el establecimiento de una tecnología de reciclaje para el tratamiento de grandes cantidades de los módulos al final de su vida útil, esto para el periodo del 2014 al 2018 [31]. Los aspectos y áreas en las que se están enfocando son el estudio de tecnologías de bajo costo para la eliminación, recogida y separación de los equipos del sistema fotovoltaico, el estudio y la demostración de tecnologías de bajo costo de reciclaje, así como la encuesta de las tendencias en el reciclaje de paneles [31].

Sin embargo el Grupo Veolia es una compañía dedicada a los procesos sostenibles como gestión del agua, residuos sólidos y energía, está presente en diferentes países del mundo incluyendo Colombia; en Francia abrieron su primera planta de reciclaje de paneles solares en 2019 iniciando con una capacidad de 1300 placas de paneles solares en 1 año y en 2020 alcanzaron a reciclar 4000 toneladas, actualmente solo reciclan placas de silicio estándar, en unos años esperan ampliarse y poder reciclar todo tipo de paneles [32].

En Colombia aún no se han generado leyes que exijan el reciclaje de paneles solares a las empresas generadoras de energía, sin embargo, desde la UPME y en conjunto con la universidad del Magdalena suscribieron un convenio interadministrativo, con el fin de aunar esfuerzos que faciliten iniciativas de economía circular en los procesos de cierre en los parques solares del Corredor vida del Cesar Magdalena [18].

Se estima que en todo el mundo solo se recicla el 10% de los paneles solares, además, se considera que los materiales resultantes del proceso de reciclaje como por ejemplo el silicio no tienen un alto valor después de reciclaje esto debido a su alta disponibilidad, por lo anterior se considera más económico usar cementerios de desechos [33].

Por este motivo, con el paso del tiempo más empresas le apuestan a la sostenibilidad ya que a corto plazo los materiales de un solo uso quedaran obsoletos. Se estima que debido al auge de la energía fotovoltaica para 2050 la cantidad de residuos formados por paneles solares ascenderá a 78 millones de toneladas. Aunque existen regulaciones en algunos países que contribuye al reciclaje de paneles solares, su implementación aún no está totalmente clara, es necesario compartir la responsabilidad entre todas las partes interesadas, ya sean fabricantes, distribuidores o empresas encargadas del montaje, mantenimiento y operación [34].

## V. CAPÍTULO 5

### a) *Metodología propuesta*

El desarrollo de este proyecto se realizó con una metodología investigativa y se llevó a cabo con la siguiente descripción de investigación:

1. Selección del tema: reciclaje de paneles solares; en esta etapa se define el problema de investigación y los objetivos específicos.
2. Revisión bibliográfica o estado del arte: la revisión bibliográfica es importante para conocer los avances en el tema, así como los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales relacionados con este proceso. Se deben identificar las fuentes de información relevantes, incluyendo artículos científicos, informes técnicos, libros, bases de datos y otras fuentes confiables que se consideren importantes cualitativos y cuantitativos, se va a definir una muestra a estudiar, así como los instrumentos de recolección de datos que se utilizaran
3. Diseño de la investigación: una vez que se haya realizado la revisión bibliográfica, se va a diseñar la investigación, para este caso en particular se puede utilizar una metodología mixta que combine datos cualitativos y cuantitativos y se va a definir una muestra a estudiar.
4. Recopilación de datos: la recopilación de datos incluye la recolección de información sobre los paneles solares y procesos de reciclaje, así como los aspectos económicos, sociales y ambientales relacionados con el tema de investigación. Observación y análisis de documentos
5. Análisis de datos: una vez que se han recopilado los datos, entraran en etapa de análisis y procesamiento. En este paso se va a desarrollar una macro en Excel con el fin de poder calcular el valor del recicle de la planta fotovoltaica de interés.
6. Discusión de resultados: la discusión de resultados implica interpretar y analizar los hallazgos de la investigación, así como establecer las implicaciones prácticas y teóricas de los mismos. Se van a analizar las limitaciones y fortalezas del estudio, y se van a dar recomendaciones para futuras investigaciones
7. Conclusiones: en este paso se van a resumir las principales conclusiones del estudio y se van a dar recomendaciones para mejorar procesos de reciclaje de paneles solares basadas en los resultados de la investigación [35].

Además, de la descripción anterior del proyecto, se va a desarrollar una macro usando Microsoft Excel para desarrollar el modelo de economía circular con la metodología propuesta en el siguiente diagrama de flujo:

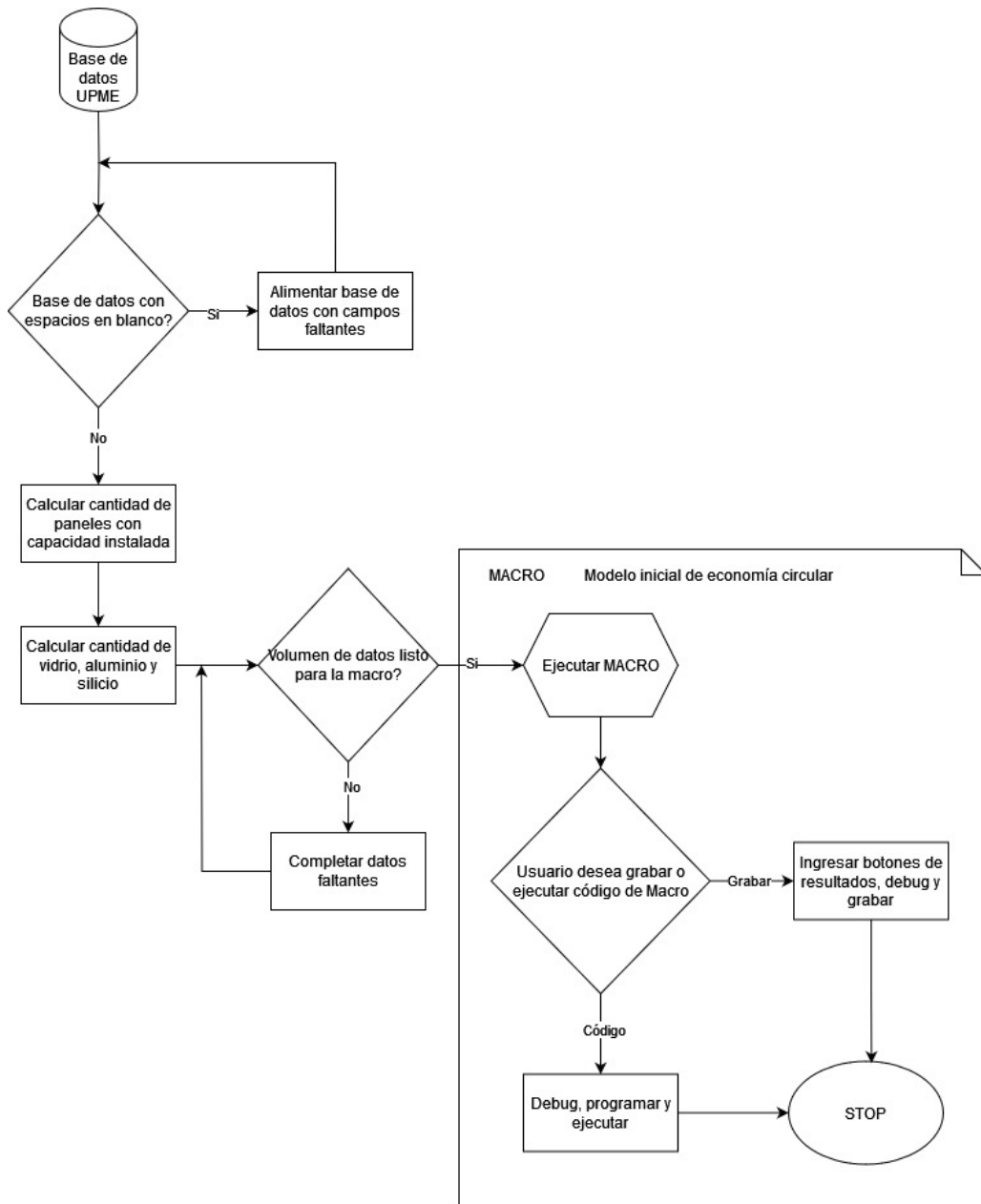


Figura 3, Diagrama de flujo para desarrollar una macro que muestre un modelo de economía circular

## VI. CAPÍTULO 6

### a) Resultados

A continuación, se va a mostrar el desarrollo de los objetivos tanto teóricos como prácticos, se va a mostrar paso a paso como se desarrolló la macro y finalmente como se llega al modelo de economía circular junto con los resultados, recomendaciones y conclusiones.

#### 6.1 Características principales de los paneles solares comerciales

Los paneles solares tienen una vida útil promedio de 25 a 30 años, dependiendo del fabricante. Es decir, que al final de ese periodo el panel solar habrá disminuido su capacidad de producir energía en un 20%. Los paneles solares más comunes son de tipo policristalino y monocristalino, los cuales abarcan el 80% del mercado fotovoltaico. También están los paneles solares tipo PERC y de acuerdo con su tecnología se encuentran los paneles solares media celda y bifaciales [36].

La principal diferencia entre los paneles solares monocristalinos y policristalinos radica en la pureza. En las células solares monocristalinas la pureza es mayor, razón por la que el color es más oscuro que los policristalinos [36].

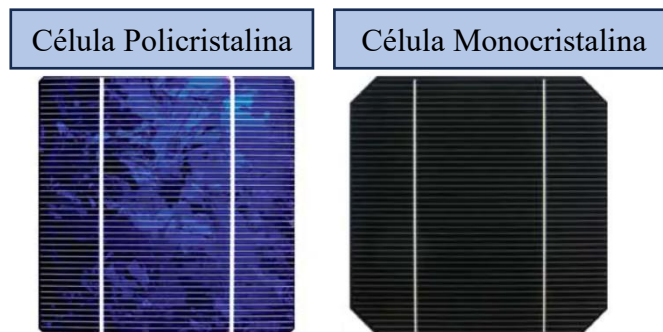


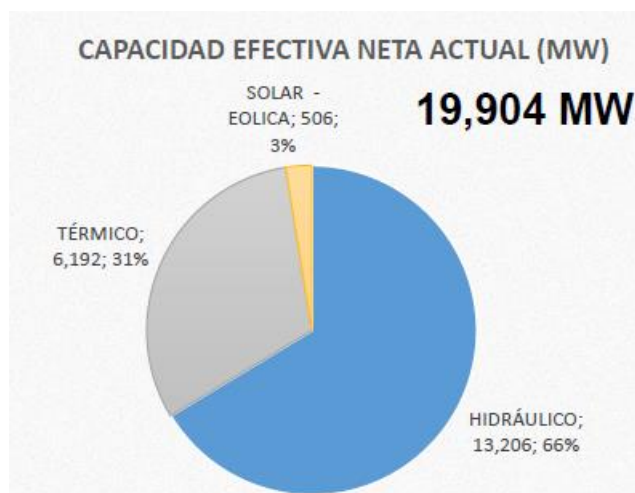
Figura 4, células solares más usadas comercialmente [36].

Cómo se puede percibir en la figura 4, los paneles solares monocristalinos pueden distinguirse de manera visual. Sin embargo, desde el punto de vista técnico, el panel solar monocristalino es más eficiente y puede trabajar mejor a temperaturas altas. Por tal razón las potencias y eficiencias más altas se han alcanzado con módulos monocristalinos [36].

Los componentes principales de los paneles solares son silicio, vidrio, cobre y estaño.

## ***6.2 capacidad instalada en Colombia y evaluación económica de la remuneración del reciclaje de los paneles solares de los proyectos instalados hasta 2023 en el largo plazo.***

Según XM la capacidad instalada en Colombia es de 19,9 MW y se distribuyen de la siguiente manera:



*Gráfica 3, Capacidad de generación de energía eléctrica instalada en Colombia [4].*

Según el anexo 1, la remuneración económica del reciclaje de los paneles solares de los proyectos instalados hasta 2023 en el largo plazo es de aproximadamente 5.500.776.296 USD, este dato se obtiene de la macro desarrollada para este trabajo la cual se explica más adelante, el valor proviene del supuesto de reciclar los componentes de los paneles solares como el silicio, vidrio y aluminio

## ***6.3 Instalación, montaje y operación de una planta de reciclaje de Paneles solares***

Los paneles solares tienen una vida larga, estos llegan a producir energía hasta por 25 años y los diversos materiales de sus componentes se pueden reciclar en un 90% contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad de esta energía limpia. El reciclaje no consiste en su reutilización de los paneles puesto que las placas solares de segunda mano nunca van a tener el mismo rendimiento que uno nuevo. El reciclaje consiste en el reaprovechamiento de los materiales de los cuales están hechos los módulos, principalmente vidrio y aluminio [37].

Los paneles fotovoltaicos se pueden reciclar prácticamente en su totalidad porque están fabricados con vidrio y aluminio, principalmente. Dos materiales que son fáciles de reutilizar, ya que no están clasificados como residuos no peligrosos.

Según el programa de sistemas Fotovoltaicos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), el año 2050 los paneles fotovoltaicos podrían alcanzar la cifra de 78 megatoneladas en todo el Planeta. Sin embargo, mediante su reciclado y su recuperación, se podrían producir de nuevo 2.000 millones de paneles, esto quiere decir que, si se lleva a cabo un procedimiento correcto de reciclado de paneles fotovoltaicos, la producción de energía solar implicaría un proceso aún más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Hasta el momento, se utilizan dos procesos para el reciclado de placas solares: térmico y mecánico [38].

- **Reciclaje Térmico:** La técnica de reciclado estándar se basa en el tratamiento térmico y consiste en quemar los plásticos para separar las células del vidrio. Esto es aproximadamente el 80% del panel. Después se llevan a cabo diferentes procesos químicos para eliminar la capa anti reflectante, si la hubiese, y separar los contactos metálicos. Los materiales semiconductores como las obleas de silicio también se pueden reutilizar. Este material se puede reciclar hasta cuatro veces [38].
- **Reciclaje Mecánico:** Consiste en moler todo el panel despejado de su marco para después ser trabajado a base de procesos químicos. Se tritura para extraer los materiales y luego se procesan para obtener materiales secundarios [38].

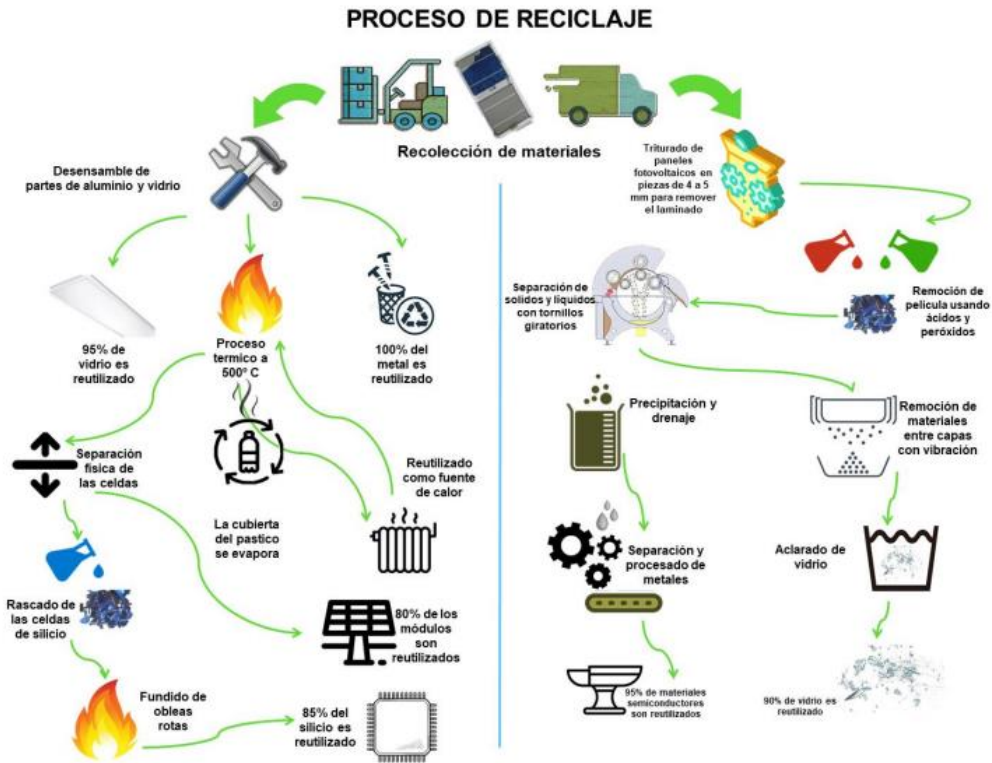


Figura 5, Procesos más representativos de reciclaje de paneles solares que existen en la actualidad [39].

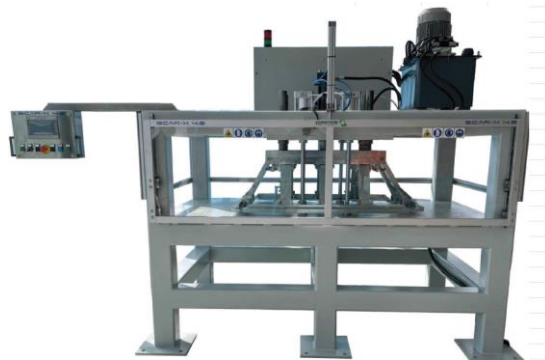
Comparativo de % reciclaje de los 2 procesos de tratamiento de los paneles  
 Tabla 2, Comparación entre 2 procesos diferentes de reciclaje de paneles solares [39].

MATERIAL	Peso Térmico	Proceso Mecánico (Trituración)
	% Reciclado	Material
Metales	100%	100%
Vidrio	95%	90%
Aluminio modular	80%	80%
Silicio y materiales semiconductores	85%	95%

Nota. Porcentajes que se obtienen del reciclaje de paneles solares dependiendo del proceso que se debe aplicar.

A continuación, los componentes requeridos para el montaje de una planta de reciclaje de paneles fotovoltaicos de vidrio

- **Separador automático para marcos:** El separador automático para marcos está proyectado para remover de una manera veloz y automática los marcos de aluminio presentes en el panel fotovoltaico. El sistema utiliza 4 brazos hidráulicos con lados intercambiables para poder adaptarse a los diferentes modelos de paneles fotovoltaicos existentes. Para la utilización de la maquinaria, es necesario un operador que siga las fases de carga y descarga de los paneles y de los productos obtenidos [40].



*Figura 6 , Modelo de separador automático para marcos [40].*

- **Cortadora de línea completa con banco:** La cortadora de línea está proyectada para dividir el panel fotovoltaico en dos partes. Este proceso aporta un elevado ahorro energético durante las sucesivas fases de laminación del vidrio. La cortadora de línea está compuesta de un banco de apoyo, un sistema de corte ideado en tal modo que no produce polvo durante la fase de división del panel y de un banco de conexión a la maquinaria de delaminación [40].



*Figura 7, Modelo de una cortadora de línea completa con banco [40].*

- **Delaminador de vidrio solar:** Este proceso es el más importante de todas las fases del tratamiento del panel, se efectúa por medio de un sistema de rulos contrapuestos y

herramientas especiales que calibran la extracción del vidrio. El sistema debe garantizar un mínimo desgaste de los componentes del equipo y una elevada calidad del vidrio obtenido haciendo el proceso de delaminación extremadamente simple con una absorción energética durante la fase de trabajo que no supera los 20 kW.

La máquina debe estar equipada con un PC industrial que además de controlar todos los procesos de trabajo y dar la posibilidad de crear una base de datos de los paneles subdivididos por marca, código y espesor del panel a tratar, además, debe contar con un sistema SCADA [40].



Figura 8, Modelo de delaminador de vidrio solar [40].

- **Cinta transportadora para descarga de vidrio:** La cinta de descarga debe estar construida en tubo de aluminio extruido con estructura de soporte inclinada. Toda la largura de la cinta está compartimentada con tapas removibles en policarbonato transparente. La cinta transportadora debe estar provista de un transportador para big bag de un diferenciador magnético de neodimio para eliminar eventuales partículas de hierro del vidrio y de una micro criba para separar las fracciones de vidrio por debajo de 1 mm [40].



*Figura 9, Modelo de Cinta transportadora para descarga de vidrio [40].*

- **Cinta transportadora para descarga de vidrio:** La cinta transportadora está fabricada en tubo de acero modular pintado a polvo. La banda de transporte está producida en goma anticorte con listas fundidas a presión [40].



*Figura 10, Modelo de una cinta transportadora para carga de los paneles delaminados en triturador [40].*

- **Triturador mono eje con empujador hidráulico:** El triturador mono eje es necesario para poder triturar el panel ya delaminado del vidrio y producir un tamaño de partículas controladas no superior a los 10/15 mm. Gracias a la alta eficiencia de las placas y a la tecnología a presión radial se contiene el desgaste que se puede producir por la presencia de silicio y residuos de vidrio que hay en el panel delaminado a triturar. La producción de

la máquina está sincronizada con la salida de la máquina para la delaminación del vidrio [40].



*Figura 11, Modelo de triturador mono eje con empujador hidráulico [40].* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

- **Turbina multisector:** La turbina de doble estadio tiene la misión de disdegradar y dividir el panel delaminado y triturado en los diferentes materiales que lo componen. Por efecto centrifugo sobre las corazas montadas al interno de la cámara de disdegradación, se diferencian el plástico del silicio y de los metales de conexión de la cedulas. Con este proceso se obtiene una mezcla de plástico, silicio y metales que se separaran en el siguiente proceso [40].



*Figura 12, Modelo de una turbina multisector [40].*

- **Sistema de cribado de 3 estados:** El sistema de cribado de 3 estadios divide por tipología el material disdegrado en el proceso anterior. La criba divide el polvo de silicio/vidrio, las conexiones en cobre-aluminio y el plástico [40].



*Figura 13, Modelo de un sistema de cribado de 3 estados[40]*

- **Tablero Eléctrico:** Para cada fase de trabajo hay un cuadro eléctrico con su correspondiente consola de comando. Todos los cuadros están conectados mediante su red ethernet sincronizando todos los procesos de trabajo. En el cuadro principal viene instalado de serie un modem para teleasistencia [40].



*Figura 14, Modelo de un tablero eléctrico [40].*

A continuación, se muestra una tabla resumen con los componentes necesarios para el montaje de una planta de reciclaje, con las cantidades correspondientes:

*Tabla 3, Componentes y cantidades de una planta de reciclaje de paneles solares [41].*

<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Separador automático para marcos
1	cortadora de línea completa con banco
1	delaminador de vidrio solar
1	cinta transportadora para descarga del vidrio
1	cinta transportadora para la carga de los paneles delaminados en el triturador
1	triturador mono eje con empujador hidráulico
2	turbina multisector
2	sistema de cribado de 3 estados
1	sistema de aspiración (opcional)
1	tablero eléctrico
1	OyM anual

<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Separador automático para marcos
1	cortadora de línea completa con banco
1	delaminador de vidrio solar
1	cinta transportadora para descarga del vidrio
1	cinta transportadora para la carga de los paneles delaminados en el triturador
1	triturador mono eje con empujador hidráulico
2	turbina multisector
2	sistema de cribado de 3 estados
1	sistema de aspiración (opcional)
1	tablero eléctrico
1	OyM anual

El precio de una planta de reciclaje es de aproximadamente 2,5 M€, puede generar alrededor de 15 empleos y dependiendo del tamaño de la planta puede procesar hasta 1060 toneladas anuales de residuo fotovoltaico lo que supone el reciclaje de 47.250 paneles al año que ya hayan llegado al final de su vida útil, se estropeen o se tengan que sustituir [42]

A continuación, se muestra la ubicación geográfica de los parques solares a gran escala radicados en la UPME hasta 2023:

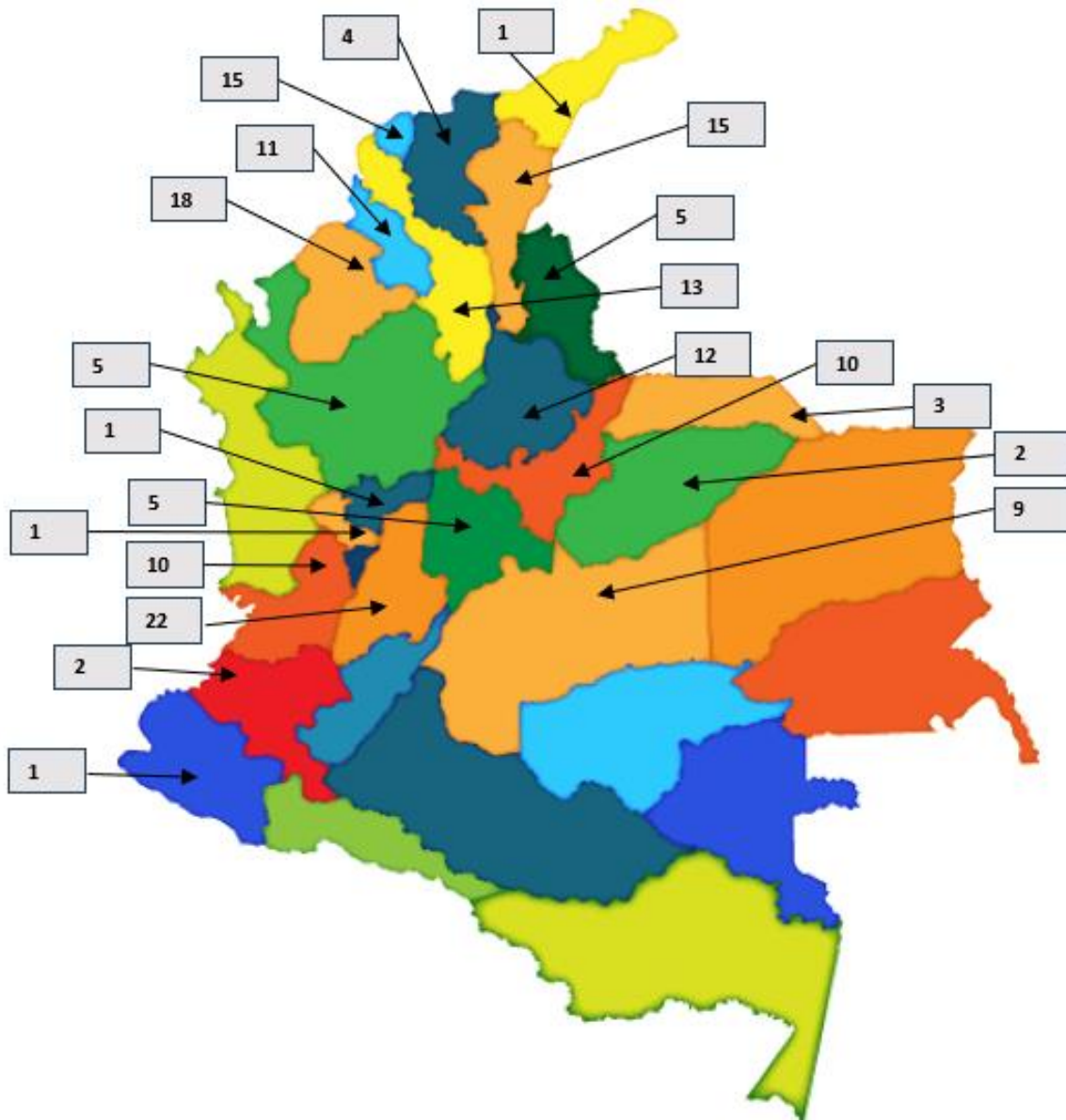


Figura 15, Mapa de Colombia referenciando la cantidad de parques solares por departamento

*Tabla 4, Departamentos de Colombia con la cantidad de parques solares a gran escala radicados en UPME a 2023*

DEPARTAMENTO	CANTIDAD
TOLIMA	22
CORDOBA	18
ATLANTICO	15
CESAR	15
BOLIVAR	13
SANTANDER	12
SUCRE	11
BOYACA	10
VALLE DEL CAUCA	10
META	9
ANTIOQUIA	5
CUNDINAMARCA	5
NORTE DE SANTANDER	5
MAGDALENA	4
ARAUCA	3
CASANARE	2
CAUCA	2
CALDAS	1
NARIÑO	1
GUAJIRA	1
RISARALDA	1

#### **6.4 Creación del modelo de economía circular a partir de una macro desarrollada en Excel**

Para desarrollar la última parte de este proyecto es importante mencionar que se realiza con el apoyo de los objetivos específicos, la propuesta que se va a mostrar para hacer el modelo de economía circular es una macro desarrollada en Excel la cual se adicionará a los anexos del proyecto

##### **Paso a paso base de datos:**

1. lo primero que se hizo fue seleccionar la base con la cual se va a desarrollar el modelo, según lo descrito en el objetivo general se seleccionará la base de los proyectos a gran escala radicados en UPME a 2023 [43], esa base se filtra por los proyectos solares que son los de interés para hacer los cálculos correspondientes, y se dejan solo las columnas útiles para el desarrollo del ejercicio:

- Fecha: esta es la fecha de radicación de los proyectos ante la UPME
- Nombre Proyecto: es el nombre inicial asignado al proyecto solar que se radica ante UPME
- Empresa: corresponde a la empresa que está haciendo la solicitud de aprobación ante UPME
- Capacidad MW: corresponde a la capacidad de generación de potencia que tendrá el parque que se construirá
- FPO: corresponde a la fecha probable de operación en el que entrará el parque a generar energía

Fecha	Nombre Proyecto	Empresa	Capacidad MW	FPO
-------	-----------------	---------	--------------	-----

Figura 16, Encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro.

2. Luego se realiza el cálculo de cantidad de paneles que tendrá cada parque, esto se hace suponiendo que todos los parques tienen el mismo modelo de panel, existen diferentes potencias en función de cada tipo de panel fotovoltaico. Estas oscilan normalmente entre 250W y 400W, aunque también pueden tener potencias más elevadas (500W) [44], para este modelo se tomará una potencia de 400 W

Fecha	Nombre Proyecto	Empresa	Cantidad de paneles	Capacidad MW	FPO
-------	-----------------	---------	---------------------	--------------	-----

Figura 17, Encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando la columna de cantidad de paneles.

3. Un panel solar que genere 400 W tiene unas dimensiones de aproximadamente 195x100 cm y pesan 24 Kg [45], de estos componentes el 76% es vidrio, el 8% es aluminio y el 5% es silicio [46], teniendo en cuenta el desarrollo del objetivo 3 donde se menciona que el 90% del vidrio, el 80 % del aluminio y el 95% del silicio se pueden reciclar, entonces

procederá a calcular los factores por los cuales se puede multiplicar el total de paneles solares por parque:

$$\text{factor para el vidrio} = (24\text{Kg} * 76\%) * 0,9 = 16,4$$

*Ecuación 1 corresponde al factor para el vidrio por el que se multiplicará la cantidad de paneles*

$$\text{Factor para el Aluminio} = (24\text{Kg} * 8\%) * 0,8 = 1,5$$

*Ecuación 2 corresponde al factor para el aluminio por el que se multiplicará la cantidad de paneles*

$$\text{Factor para el silicio} = (24\text{Kg} * 5\%) * 0,95 = 1,14$$

*Ecuación 3 corresponde al factor para el silicio por el que se multiplicará la cantidad de paneles*

Fecha	Nombre Proyecto	Empresa	Cantidad de paneles	Capacidad MW	FPO	Peso del vidrio [Kg]	Peso del Silicio [Kg]	peso del aluminio [Kg]
-------	-----------------	---------	---------------------	--------------	-----	----------------------	-----------------------	------------------------

*Figura 18, Encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas de peso del vidrio [Kg], Peso del silicio Kg y peso del aluminio en Kg*

- Con los datos del peso de los materiales principales con alto potencial para reciclarlos, se procederá a calcular el precio individual usando el valor del kilo de vidrio a \$193 [47]; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, como este valor está al año 2023 se multiplicará por el 9,28% valor del IPC para tener el precio 2024 [48] esto da 210,37, el kilo de silicio vale aproximadamente 38 dólares en 2022 [49], es decir, casi \$187218 precio 2024 (suponiendo el valor del dólar a \$4000) y el aluminio a \$4200 kilo [50], con estos datos ya puedo tener el valor total del precio de reciclaje de cada una de las plantas

Peso del vidrio [Kg]	Peso del Silicio [Kg]	peso del aluminio [Kg]	precio del vidrio [\$]	precio del silicio [\$]	precio del aluminio [\$]	Valor Total del reciclaje de la planta
----------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	--------------------------	--

Figura 19, Encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas precio del vidrio [\$], precio del silicio [\$], precio del aluminio en [\$] y con la suma de todos los anteriores se procede a

- Por último, para completar la base se adicionan 2 columnas más, para saber cuánto vale el total del reciclaje de la planta en Euros (1 Euro = \$4287) y en Dólares (1 dólar= \$4000)

Peso del vidrio [Kg]	Peso del Silicio [Kg]	peso del aluminio [Kg]	precio del vidrio [\$]	precio del silicio [\$]	precio del aluminio [\$]	Valor Total del reciclaje de la planta	Valor Euros [€]	Valor Dolares [\$]
----------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	--------------------------	--	-----------------	--------------------

Figura 20, Encabezado inicial de la base de datos con la que se desarrollará la macro adicionando las columnas valor en Euros [€] y Valor en dólares [\$]

El valor de Euro y el Dólar están formulados en una sola casilla, es decir si se quiere cambiar no hay que hacer todo el ejercicio nuevamente ya que la base está toda formulada

### 6.3.1 Paso a paso: Desarrollo de la Macro

Con la información completa de la base, se pasa a grabar la macro, es importante tener una función en Excel activa que se llama programador, en la web se encuentran muchos tutoriales de como activarla, luego saber que botones se requieren para el uso de la base de datos y tener claro que información y gráficas de interés se quieren visualizar

Figura 21, Entorno gráfico de la macro

### Botones principales:

- En la casilla donde dice “Nombre Proyecto” se debe ingresar el proyecto con el nombre exacto con el que fue registrado en UPME y oprimir el botón “BUSCAR” donde se encuentran los botones principales
- El botón “INGRESAR” sirve para adicionar proyectos a la base de datos principal

3. El botón “RESET” sirve para dejar en blanco nuevamente los campos, pero no borra los campos financieros

### **Botones Financieros:**

Los botones financieros solo funcionan si se ha buscado el proyecto con el botón principal “BUSCAR”

4. El botón “COP [\$]” trae el valor del precio de los materiales a reciclar del parque que se buscó en moneda Colombiana
5. El botón “EUROS [€]” trae el valor del precio de los materiales a reciclar del parque que se buscó en Euros
6. El botón “USD [\$]” trae el valor del precio de los materiales a reciclar del parque que se buscó en moneda Estadounidense
7. El botón “TODOS” trae el precio de las 3 monedas
8. El botón “RESET” en color gris solo borra la información de los campos financieros

Los botones financieros funcionan en cualquier orden


9. El botón “BASE” lleva al usuario donde está la base cambiando de hoja desde el entorno principal de la macro hacia donde se encuentran los datos de base
10. El botón “PDF” descarga al usuario 4 documentos, en el primer documento se encuentra la información general que entrega la macro con el botón “BUSCAR”, en el 2do documento hay 2 gráficas con el título “FPO”, en el 3er documento se encuentra una gráfica que tiene el título “FPO Vs FECHA DE DESMANTELACIÓN” y el 4to documento entrega una gráfica que tiene como título “FPO Vs FPD” que se refiere a la fecha probable de operación Vs la fecha probable de desmantelamiento

A continuación, un par de ejemplos de cómo funciona la macro: para este caso se va a tomar como referencia el parque solar LA LOMA y el parque solar CELSIA ESPINAL, los cuales fueron inaugurados hace poco por grupo Enel y por CELSIA respectivamente, en el departamento del Cesar [51] y en el departamento del Tolima. El parque de ENEL fue registrado en UPME con el nombre LATAMSOLAR LA LOMA y el parque de CELSIA fue registrado como “Concepto de viabilidad técnica Autogeneración "Celsia Solar Espinal" 9,9 MW” [52] es decir con esos mismos nombres se deben buscar en la herramienta:

## Parque Solar LATAMSOLAR LA LOMA

BASE

# MODELO ECONOMIA CIRCULAR

  
**Universidad del  
Rosario**

Fecha <input type="text" value="29/08/2019"/>	Cantidad de paneles <input type="text" value="375000"/>	COP [S] \$ <input type="text" value="83.691.970.500"/>
Nombre Proyecto <input type="text" value="LATAMSOLAR LA LOMA"/>	Capacidad MW <input type="text" value="150"/>	EUROS [€] € <input type="text" value="19.592.290"/>
Empresa <input type="text" value="EGP FOTOVOLTAICA LA LOMA SAS"/>	FPO <input type="text" value="5/06/2022"/>	USD [S] <input type="text" value="\$21.433.514"/>

INGRESAR

RESET

BUSCAR

Botones Principales

COP [S]

EUROS [€]

USD [S]

TODOS

RESET

Botones Financieros

PDF

Figura 22, Resultado que entrega la macro cuando se le ingresa un parque solar que tiene registrado en su base después de oprimir el botón “BUSCAR” y el botón “TODOS”

Cuando se oprime el botón “PDF” se entrega la siguiente información en los 4 archivos:

### Archivo 1

Este documento entrega un resumen del proyecto que se seleccionó de la base de datos, donde incluye la fecha en la que se radicó el proyecto, nombre del proyecto, Empresa, cantidad de paneles, capacidad MW, FPO, el valor en COP del precio de reciclaje de los paneles, el valor en EUROS del reciclaje de los paneles y el valor en USD

### MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR

Fecha <input type="text" value="29/08/2019"/>	Cantidad de paneles <input type="text" value="375000"/>	COP [S] \$ <input type="text" value="83.691.970.500"/>
Nombre Proyecto <input type="text" value="LATAMSOLAR LA LOMA"/>	Capacidad MW <input type="text" value="150"/>	EUROS [€] € <input type="text" value="19.592.290"/>
Empresa <input type="text" value="EGP FOTOVOLTAICA LA LOMA SAS"/>	FPO <input type="text" value="5/06/2022"/>	USD [S] <input type="text" value="\$21.433.514"/>

Figura 23, Información que entrega el PDF 1 de la macro

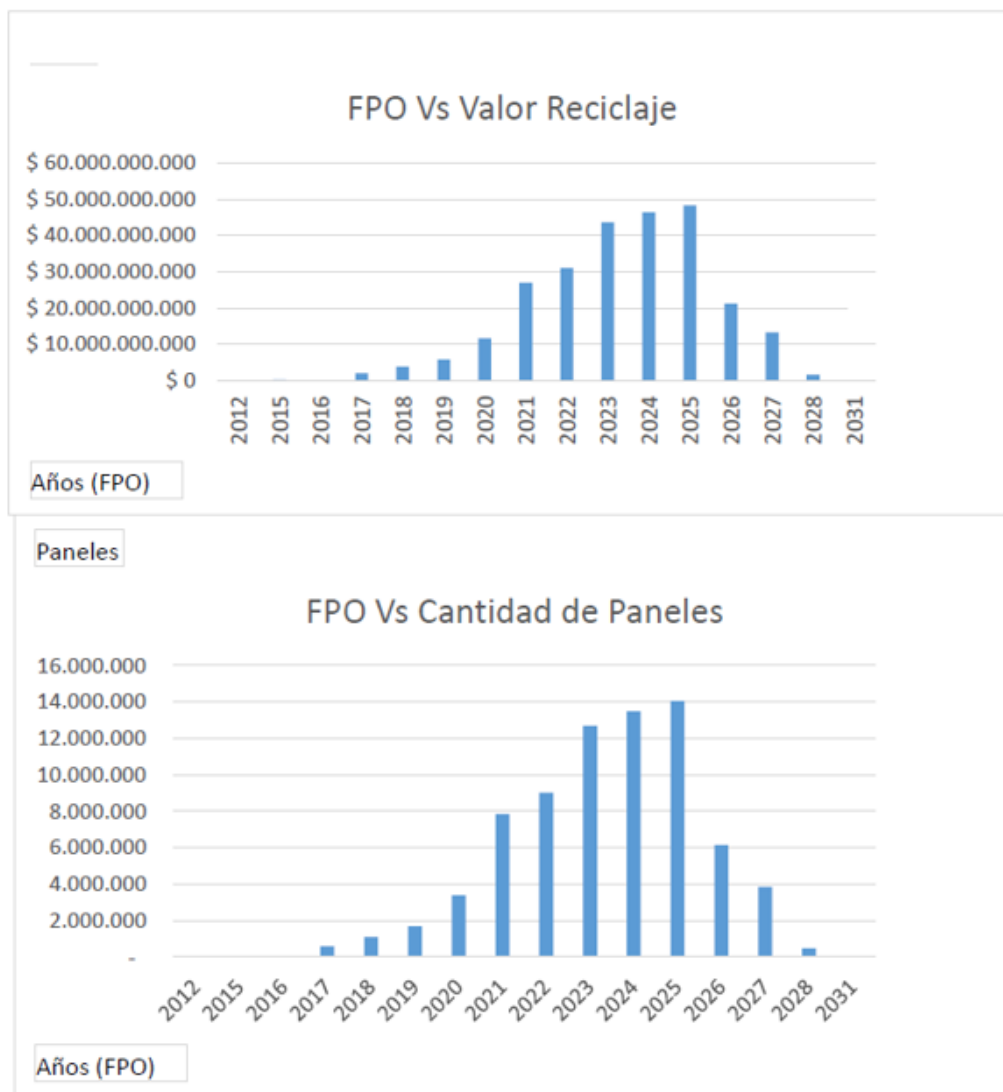
## Archivo 2

La gráfica de FPO Vs Valor del reciclaje, muestra todos los proyectos que están incluidos en la base con su fecha probable de operación y cuánto vale a precio 2024 la cantidad el reciclaje de los componentes.

La gráfica FPO Vs cantidad de paneles, es muy parecida a la primera gráfica con la diferencia que ya no es con el precio en el eje Y sino con la cantidad de paneles

Ambas gráficas se sacaron con la finalidad de analizar los años críticos donde hay un volumen alto de ingreso de parques solares

### GRÁFICAS FPO

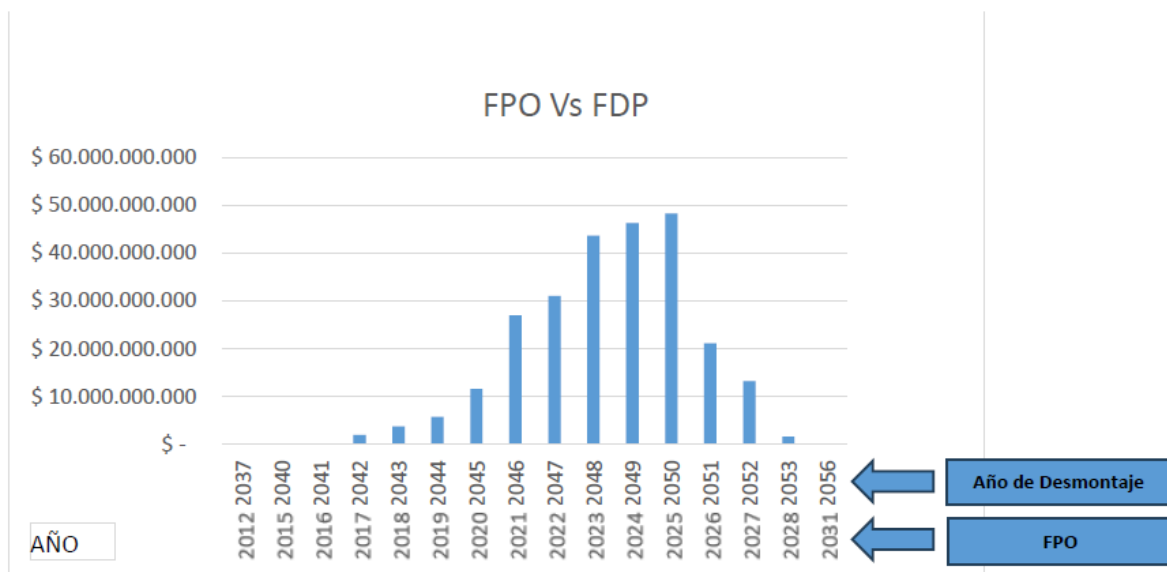


Gráfica 4, Información que entrega el PDF 2 de la macro

### Archivo 3

Esta gráfica muestra la fecha probable de operación Vs la fecha probable de desmantelamiento, esta gráfica se incluyó con el fin de visualizar donde se traslapan las fechas y que el usuario pueda identificar en que año debe prepararse para la desinstalación del parque solar, por ejemplo para el caso de la Loma este inicialmente tenía como FDO: 5 mayo de 2022, es decir, que su fecha probable de desmantelamiento es en el año 2047, esto basados en la vida útil de un parque fotovoltaico que son 25 años aproximadamente [53].

## FPO Vs FECHA DE DESMANTELACIÓN

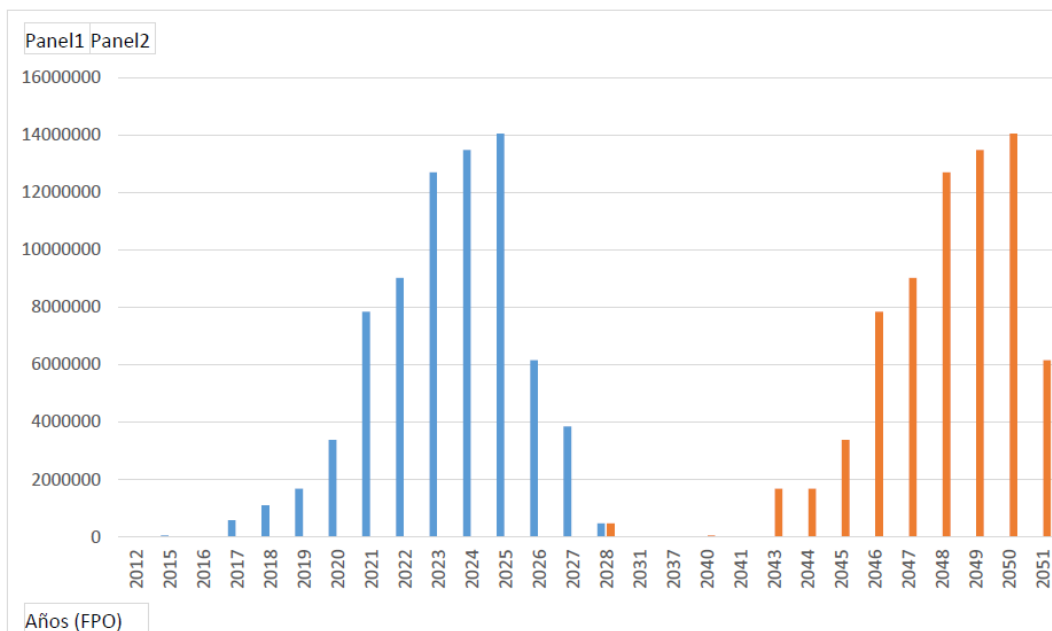


Gráfica 5, Información que entrega el PDF 3 de la macro

### Archivo 4

El último documento muestra la combinación entre la fecha probable de operación de todos los parques solares de la base y donde se empieza a cruzar con la fecha probable de desmantelamiento de los primeros parques que radicaron en UPME se puede ver que el año de traslape es el 2028

## FPO Vs FPD



Gráfica 6, Información que entrega el PDF 4 de la macro

Parque Solar: Celsia Solar Espinal

## MODELO ECONOMIA CIRCULAR



Fecha	<input type="text" value="10/05/2019"/>	Cantidad de paneles	<input type="text" value="24750"/>	COP [\$]	<input type="text" value="\$ 85.100.400"/>
Nombre Proyecto	<input type="text" value="Concepto de viabilidad técnica Autogeneración 'Celsia Solar Espinal' 9,9 MW"/>	Capacidad MW	<input type="text" value="9,9"/>	EUROS [€]	<input type="text" value="€ 20.407"/>
Empresa	<input type="text" value="CELSIA COLOMBIA"/>	FPO	<input type="text" value="31/12/2020"/>	USD [\$]	<input type="text" value="\$21.675"/>

PDF

Figura 24, Resultado que entrega la macro cuando se le ingresa un parque solar que tiene registrado en su base después de oprimir el botón “BUSCAR” y el botón “TODOS”

Las demás gráficas se muestran exactamente igual que las del parque solar la loma ya que estas son generales para toda la base

## VII. CAPÍTULO 7

### a) Conclusiones y recomendaciones

1. Desde el inicio de esta investigación hasta el final, no se conoce una regulación especial para el reciclaje de paneles solares, si existe en RAE y estos elementos están allí incluidos, sin embargo, por el volumen tan grande de parques solares que se están instalando en Colombia, es necesario una ley que regule y que solicite el plan de desmantelamiento a las grandes empresas.
2. Tomando como referencia el proyecto LA LOMA donde su inversión fue de aproximadamente 126 MUSD [51] y el valor que está calculando de la macro de reciclaje de paneles solares es de aproximadamente 21.4 MUSD, el valor que podrían ganar las empresas al vender los componentes de los paneles al final de la vida útil es de aproximadamente el 17% de su inversión inicial.
3. El cálculo de la cantidad de paneles solares que puede tener un proyecto basándose en la capacidad instalada puede variar dependiendo del modelo de paneles solares que se escojan, por ejemplo, tomando nuevamente como referencia el proyecto de LA LOMA, con las consideraciones que se hicieron al inicio el modelo entregó un total de 37500 paneles solares, sin embargo, el proyecto real tiene 400000 paneles instalados, es decir que para este caso el error que se presenta es del 9,3%.
4. En el objetivo principal se menciona que el modelo que se pretende proponer es para proyectos a gran escala, sin embargo, el modelo que finalmente se desarrolló sirve para cualquier tipo de parque solar, incluso los que no están radicados en UPME, lo único que se debe hacer es cambiar la base y actualizar la potencia que genera el modelo seleccionado de panel, el precio de los componentes, el valor del euro y el dólar correspondiente a la fecha que se haga el análisis, es importante mencionar que estos proyectos están en crecimiento y seguramente vendrán muchos más montajes.
5. Los valores que se mencionan en este trabajo son a 2024 si se necesita hacer una proyección a los años siguientes se debe hacer un análisis financiero más exhaustivo donde tenga en cuenta otras variables, como la INDEXACIÓN, VPN, tasa de retorno, entre otros.
6. Los componentes con los que se hizo el análisis fueron vidrio, silicio y aluminio, sin embargo, este no es el 100% de los componentes de un panel, hay un 11% adicional el

cual no se contempló ya que su valor nos es relevante en comparación con los otros componentes que forman el 89% de los paneles solares.

7. En el objetivo 2 se menciona que la matriz energética en Colombia solo tiene una participación del 3% de las energías renovables, pero en la última subasta de energía del país se espera que para 2027 las energías renovables aumenten al 26%, lo que quiere decir que entraran en operación muchos más parques solares.
8. En el objetivo 3 se menciona el valor del montaje de una planta de reciclaje y se muestran dónde están ubicados los proyectos solares a gran escala, una ubicación estratégica para una planta de reciclaje de paneles solares podría ser en el departamento del Tolima y en el departamento de Santander, pero se tendría que contemplar todos los gastos logísticos que se podrían generar del traslado del material antes y después de procesarlo.
9. Es importante mencionar que las gráficas que arrojan los archivos solo cambian si se cambia la base.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] BBVA, «¿Qué es la economía circular?», BBVA NOTICIAS. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-economia-circular/>
- [2] J. Izquierdo, «7 razones por las que debes utilizar metodologías ágiles», *Think. Innov.*, abr. 2022, Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iebschool.com/blog/por-que-utilizar-metodologia-agiles-agile-scrum/>
- [3] «Ley 2099 de 2021 - Gestor Normativo - Función Pública». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- [4] «Energías renovables garantizan energía firme en el Sistema Interconectado Nacional para el periodo de vigencia 2027 y 2028», Minenergía. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/energ%C3%ADas-renovables-garantizan-energ%C3%ADa-firme-en-el-sistema-interconectado-nacional-para-el-periodo-de-vigencia-2027-y-2028/>
- [5] Q. Han *et al.*, «Hydrometallurgy recovery of copper, aluminum and silver from spent solar panels», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, n.º 1, p. 109236, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2022.109236.
- [6] A. Ramírez Agudelo, «Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia», 2018, Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/c756f0aa-9ae7-4f02-8cf0-50e06910bd0b>
- [7] J. F. Chaparro Pérez, «Manejo Integral de Residuos Generados por los paneles solares fotovoltaicos en Colombia», jun. 2019, Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/32081>
- [8] K. Máčalová, V. Václavík, T. Dvorský, R. Figmig, J. Charvát, y M. Lupták, «The Use of Glass from Photovoltaic Panels at the End of Their Life Cycle in Cement Composites», *Materials*, vol. 14, n.º 21, p. 6655, nov. 2021, doi: 10.3390/ma14216655.
- [9] S. Weckend, A. Wade, y G. Heath, «End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels», NREL/TP--6A20-73852, T12-06:2016, 1561525, jun. 2016. doi: 10.2172/1561525.
- [10] «Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Estrategias de aprovechamiento de residuos sólidos producidos por las celdas fotovoltaicas en el aprovechamiento de la energía solar en proyectos de producción más limpia en Colombia». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8736>
- [11] V. Fthenakis, R. Frischknecht, M. Raugei, P. Sinha, y M. Stucki, *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. 2011.
- [12] «Subasta CLPE No. 03-2021». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/Subastas-largo-plazo/Paginas/Subasta-CLPE-03-2021.aspx>
- [13] «Generación de residuos-e en Brasil», Statista. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/1218415/generacion-residuos-electronicos-brasil/>
- [14] «Ley 1672 de 2013», Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/ley-1672-de-2013/>
- [15] <https://www.virtualpro.co>, «Materiales y materias primas. Silicio», VirtualPro.co. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/materiales-y-materias-primas-silicio>
- [16] «¿De qué están hechos los paneles solares? - Paneles Solares Colombia Lámparas Solares Ingeniería Eléctrica Energía Solar Baterías Solares Cucuta Materiales». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ineldec.com/de-que-estan-hechos-los-paneles-solares-fotovoltaicos/>
- [17] «Cobre - Concepto, propiedades, usos y aplicaciones». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/cobre/#ixzz8H1QUSSA>

- [18] «2\_Economía\_Circular\_Cierre\_Parques\_Solares\_Corredor\_vida\_Cesar\_Magdalena\_UM\_v2.pdf». Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados\\_convenios/2\\_Economía\\_Circular\\_Cierre\\_Parques\\_Solares\\_Corredor\\_vida\\_Cesar\\_Magdalena\\_UM\\_v2.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Resultados_convenios/2_Economía_Circular_Cierre_Parques_Solares_Corredor_vida_Cesar_Magdalena_UM_v2.pdf)
- [19] M. Moran, «Consumo y producción sostenibles», *Desarrollo Sostenible*. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [20] O. M. Álvarez, «El Día de la Sobrecapacidad de la Tierra, explicado», *Periodismo de Barrio*. Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://periodismodebarrio.org/2023/07/el-dia-de-la-sobrecapacidad-de-la-tierra-explicado/>
- [21] «Impacto ambiental y económico de la economía circular.» Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.atika.co/impacto-ambiental-y-economico-de-la-economia-circular>
- [22] «Economía circular en la gestión de residuos: plantas Waste to Energy». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/economia-circular-gestion-residuos-plantas-waste-energy/>
- [23] «Residuos, un desafío social, psíquico y económico - Red Campus Sustentable». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.redcampussustentable.cl/residuos-un-desafio-social-psiquico-y-economico/>
- [24] «El diagrama de la mariposa: visualizando la economía circular». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>
- [25] P. R. Dias, M. G. Benevit, y H. M. Veit, «Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation», *Waste Manag. Res. J. Sustain. Circ. Econ.*, vol. 34, n.º 3, pp. 235-245, mar. 2016, doi: 10.1177/0734242X15622812.
- [26] M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, y M. Alkasrawi, «Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook», *Sci. Total Environ.*, vol. 759, p. 143528, mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
- [27] «Home-PV-Cycle», <https://pvcycle.org/>. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pvcycle.org/>
- [28] N. Bonilla-Gómez, «Análisis del Ciclo de Vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica», 2016, Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6539>
- [29] Yumpu.com, «Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program», yumpu.com. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/view/2944270/overview-of-first-solars-module-collection-and-recycling-program>
- [30] H. Ashfaq, I. Hussain, y A. Giri, «Comparative analysis of old, recycled and new PV modules», *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 29, n.º 1, pp. 22-28, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jksues.2014.08.004.
- [31] J. Y. Moreno Celis, «Propuesta metodológica para el proceso de reciclaje de silicio de grado solar en módulos fotovoltaicos», sep. 2022, Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/11474>
- [32] «Por primera vez en Francia, PV CYCLE y Veolia reciclarán paneles fotovoltaicos antiguos», Veolia España. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.veolia.es/noticias/primera-vez-francia-pv-cycle-veolia-reciclaran-paneles-fotovoltaicos-antiguos>
- [33] C. Sener y V. Fthenakis, «Energy policy and financing options to achieve solar energy grid penetration targets: Accounting for external costs», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 854-868, abr. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.030.

- [34] A. O. Ghaleb Al-Aqqad y J. Menyhart, «Solar panels problem after end-of-life and waste management (SWOT analysis for the global directives of PV's waste management)», *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, vol. 14, n.º 2, pp. 220-229, may 2023, doi: 10.1556/1848.2022.00511.
- [35] E. Academy, «¿Cómo elegir la mejor metodología de investigación para su estudio?», Enago Academy Spanish. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enago.com/academy/latam/choose-best-research-methodology/>
- [36] «Paneles Solares 450W Monoperc Luxen - Paneles Solares Colombia Lamparas Solares Ingeniería Eléctrica Energía Solar Baterías Solares Cucuta Materiales». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ineldec.com/producto/paneles-solares-colombia/>
- [37] «Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Guía para la disposición de paneles solares al final de su ciclo de vida en Colombia». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8894>
- [38] DamiaSolar, «¿Cómo se reciclan los paneles solares?», Blog Damia Solar. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.damiasolar.com/blog/como-se-reciclan-los-paneles-solares/>
- [39] «Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Guía para la disposición de paneles solares al final de su ciclo de vida en Colombia». Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8894>
- [40] D. G. T. srl, «SOLAR 4.0», COMPTON INDUSTRIALE. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.compton-industriale.it/solar-4.0.html>
- [41] «Línea de reciclaje para paneles fotovoltaicos - Iber Recycling». Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iber-recycling.com/reciclaje-paneles-fotovoltaicos/>
- [42] «La primera planta de reciclaje de paneles solares de España - esenergía». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://esenergia.es/planta-reciclaje-paneles-solares/>
- [43] «Inscripción de proyectos de generación». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/siel/Pages/Inscripcion-proyectos-generacion.aspx>
- [44] J. Mateo, «¿Cómo Calcular los kWh que Produce un Panel Solar?», POWEN. Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://powen.es/kwh-panel-solar/>
- [45] admin, «¿Cuánto pesan los paneles solares?», Tictacsolar. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tictacsolar.com/blog/peso-paneles-solares/>
- [46] «Cobre y aluminio: ¿Qué porcentaje de estos materiales se puede recuperar de un panel solar?» Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/noticias/sectoriales/50634/cobre-aluminio-porcentaje-se-puede-recuperar-panel-solar>
- [47] «Encuesta 2022febrero precios de reciclaje - Desarrollado por: ENCUESTA DE PRECIOS DEL MERCADO DE - Studocu». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/co/document/fundacion-universitaria-monserrate/economia-colombiana/encuesta-2022febrero-precios-de-reciclaje/39661781>
- [48] N. B. Perico, «IPC 2023 en Colombia quedó en 9,28%: arriendo y productos que suben de precio este 2024», El Tiempo. Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/economia/finanzas-personales/ipc-2023-en-colombia-arriendo-y-otros-productos-que-subiran-de-precio-842765>
- [49] «Silicio: Las variaciones de su precio continuarían hasta finales de 2023». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enlight.mx/blog/silicio-las-variaciones-de-su-precio-continuarian-hasta-finales-de-2023>
- [50] «Precio del Aluminio Hoy 2024 \* Bogotá Precios por Kilo Mayor», Compra de Aluminio. Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://compradealuminio.com.co/precio-del-aluminio-hoy-2024/>

- [51] «Parque solar La Loma, Colombia». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/proyectos/en-construccion/parque-solar-la-loma>
- [52] «Celsia inaugura en El Espinal la primera granja solar del Tolima que genera 9,9 megavatios de energía limpia», Celsia. Accedido: 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.celsia.com/es/noticias/celsia-inaugura-en-el-espinal-la-primera-granja-solar-del-tolima-que-genera-99-megavatios-de-energia-limpia/>
- [53] «¿Cuál es la vida útil de una instalación fotovoltaica? | factorenergia». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/cual-es-la-vida-util-de-una-instalacion-fotovoltaica/>