

**Análisis de Uso Final de Paneles Solares y Sistemas de Almacenamiento de
Energía en Colombia**

Elaborado por

Manuel Alejandro Lizarazo Rodriguez

Universidad EAN

Seminario de Investigación

Bogotá

Noviembre 2025

Contenido

1. Resumen	4
2. Planteamiento del problema	4
2.1. Problema de investigación	4
2.1. Pregunta de investigación	5
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Justificación	6
5. Marco Teórico	6
5.1. Introducción y alineación con los objetivos de investigación	6
5.2. Contexto de la transición energética en Colombia	6
5.3. Fundamentos técnicos de los módulos fotovoltaicos y su implicación para la gestión final	7
5.4. Tecnologías de reciclaje: descripción, ventajas y limitaciones	7
5.5. Infraestructura logística y cadena de valor para la disposición final	8
5.6. Marco regulatorio y políticas públicas aplicables	8
5.7. Desafíos técnicos de integración con sistemas de almacenamiento (BESS)	8
5.8. Implicaciones económicas: costos, incentivos y modelos de financiamiento	9
5.9. Impactos ambientales y socioeconómicos de una gestión inadecuada vs circular ..	9
5.10. Buenas prácticas internacionales y lecciones aplicables a Colombia	9
5.11. Vacíos de conocimiento y prioridades de investigación	9
5.12. Conclusión del marco teórico	9
6. Marco Metodológico	10
6.1. Tipo de estudio	10
6.2. Enfoque de Investigación	11
6.3. Diseño de investigación	11
6.4. Población de Muestra	12
6.5. Instrumentos y técnicas de recolección de datos	13
6.6. Procedimiento	14

7. Análisis de Datos	15
8. Consideraciones Éticas.....	15
9. Conclusiones.....	16
➤ Desafío crítico para la sostenibilidad energética.....	16
10. Recomendaciones	18
11. REFERENCIAS	19

1. Resumen

Pendiente por construcción al final del documento.

2. Planteamiento del problema

2.1. Problema de investigación

La masificación de proyectos de generación de energía solar fotovoltaica en Colombia, está incentivando el incremento de la población de paneles solares para la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables no convencionales (FRNC) en el país. Según Adrián Correa, director de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, más de dos gigavatios del total de 20 gigavatios de capacidad instalada en el país provienen de fuentes solares (Presidencia de la República de Colombia, 2025, párr. 1). Es decir, que la capacidad instalada en tecnología de paneles solares se encuentra cercana a un 10% del total.

Veamos el rápido crecimiento que han tenido los proyectos de energía solar en Colombia. Para el año 2022, la capacidad instalada de energía solar Colombia alcanzó más de 1.3 GW, lo que marco un avance en la transición energética del país (Ministerio de Minas y Energía, 2022). Sin embargo, a 2025 tenemos más de 2 GW en capacidad solar instalada, lo anterior representa un crecimiento del 53% respecto al año 2022. Ahora bien, en el corto plazo los proyectos de energía solar continuaran su camino ascendente proyectando que para el 2030 la capacidad instalada será de 19.80 GW lo que sería equivalente a la totalidad de la capacidad instalada en la actualidad.

Si bien, la generación de energía eléctrica mediante paneles solares es conocida por no generar huella de carbono, se debe tener en cuenta que los paneles solares tienen una vida útil de entre 25 y 30 años, es decir que en dos décadas los primeros paneles solares instalados en el país finalizaran su vida útil y vendrá con ello la acumulación de residuos de paneles solares y la necesidad de tener para entonces una política clara para la gestión adecuada de estos residuos. Si para entonces no se tienen un sistema de gestión integral para la disposición final de paneles solares, vendrán algunas afectaciones al medio ambiente por causa de estos desechos. Un panel solar típico está compuesto principalmente por vidrio que representa alrededor del 54,7% de su peso, seguido del aluminio 12,7%, adhesivos o sellantes 10%, silicio 3,1% y otros materiales 19,5% que

incluyen polímeros y metales menores (Al Amin bin Mohamed Sultanm, Lim & Mativenga, 2025).

Aunque actualmente el gobierno colombiano en cabeza del Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) han venido trabajando desde el año 2014 en la regulación necesaria para fomentar e incentivar la transición energética en el país, por el momento no existe regulación específica respecto a la disposición final de los paneles solares y sus elementos asociados. Por lo anterior, es importante determinar los aspectos clave que permitan asegurar adecuada disposición final de los paneles solares que entran en de uso por cumplimiento de su vida útil u otras razones.

2.1. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los principales desafíos regulatorios, técnicos y económicos que enfrenta Colombia para implementar un sistema de gestión integral para el uso final de paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Definir y evaluar cuales son los principales desafíos regulatorios, técnicos y económicos que enfrenta Colombia para implementar un sistema de gestión integral para el uso final de paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar el marco regulatorio existente en Colombia, para determinar su aplicabilidad y las brechas que impiden una gestión integral de los paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil.
- Caracterizar los procesos y tecnologías de reciclaje de paneles solares, así como la infraestructura necesaria, para evaluar su viabilidad técnica en el contexto colombiano.
- Evaluar los desafíos económicos que se deben tener en cuenta, para la implementación de un sistema de gestión integral para el reciclaje de paneles solares en Colombia.
- Formular una propuesta metodológica para la adecuada disposición final de paneles solares en Colombia.

4. Justificación

El acelerado crecimiento de la energía solar fotovoltaica en Colombia, impulsado por políticas de gobierno para la transición energética, presenta un desafío que debe ser abordado con prioridad. Si bien la implementación de fuentes de generación de energía no renovable es fundamental para reducir la huella de carbono ocasionada por el consumo de energía eléctrica, existe de necesidad de fortalecer las políticas y normatividades respecto a la disposición final de estos equipos.

Lo anterior es relevante, considerando que la vida útil de los paneles solares es entre 25 y 30 años, dada la masificación actual, se proyecta que en los próximos años vendrá un crecimiento exponencial en la implementación de proyectos de este tipo, esto significa que en 20 años el país enfrentara una acumulación masiva de residuos, que al no ser gestionados adecuadamente podrían ocasionar una afectación al medio ambiente atenuando la problemática ambiental que hoy vive el planeta tierra.

5. Marco Teórico

5.1. Introducción y alineación con los objetivos de investigación

El presente marco teórico articula el estado del conocimiento relevante para el análisis de los desafíos regulatorios, técnicos y económicos asociados con la gestión del uso final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia. Su estructura responde directamente a los objetivos específicos del estudio: (1) analizar el marco regulatorio y sus brechas; (2) caracterizar procesos y tecnologías de reciclaje; (3) evaluar desafíos económicos; y (4) proponer una metodología para la disposición final (UPME, 2024).

5.2. Contexto de la transición energética en Colombia

La rápida incorporación de la energía solar en la matriz energética colombiana ha modificado las condiciones de planificación, gestión de recursos y la composición de la matriz energética del país. Informes institucionales señalan aumentos relevantes en la capacidad instalada de energía renovable durante el periodo 2022–2024, Actualmente la capacidad instalada neta del país es de 20,86 GW de cuales 2,00 GW corresponde a energía solar, lo que representa un incremento significativo respecto a 2024 donde la capacidad instalada en sistemas solares era de 1,30 GW, lo cual anticipa un incremento proporcional en los residuos fotovoltaicos hacia 2045–2050 si no se desarrollan estrategias de gestión

del fin de vida útil (MinEnergia, 2025; XM, 2025). Este contexto nacional obliga a incorporar la economía circular como pilar de política energética (MinAmbiente, 2023).

5.3. Fundamentos técnicos de los módulos fotovoltaicos y su implicación para la gestión final

Los módulos fotovoltaicos comerciales están compuestos principalmente por vidrio (~70%), aluminio (~8–10 %), polímeros encapsulantes (~3–5 %) y células de silicio (~3–5 %), además de pequeñas cantidades de metales preciosos y soldaduras con estaño y cobre (Al Amin bin Mohamed Sultan, Lim, & Mativenga, 2025). Estas composiciones determinan la viabilidad técnica de recuperación y reciclaje, pues el alto contenido de vidrio y aluminio facilita procesos mecánicos, mientras que la extracción de silicio y metales traza exige procesos térmicos o químicos más costosos (Chowdhury, Hossain, & Islam, 2023).

5.4. Tecnologías de reciclaje: descripción, ventajas y limitaciones

Las técnicas de gestión al final de la vida se agrupan en: (i) procesos mecánicos (tritución, separación por densidad y separación magnética) orientados a recuperar vidrio, marcos y cables; (ii) procesos térmicos (deslaminación por calor) útiles para liberar encapsulantes y separar capas; y (iii) procesos químicos (disolventes y tratamientos para extracción de silicio y metales de interés). Métodos híbridos combinan etapas anteriores para mejorar recuperación de materiales y minimizar residuos secundarios. Sin embargo, la eficiencia de recuperación, costos energéticos y requerimientos ambientales de los procesos químicos son barreras para su implementación a escala en países en vía de desarrollo. (Chowdhury, Hossain, & Islam, 2023).

Actualmente, el método más utilizado en países de Europa y Asia es el método mecánico, dicho proceso consiste en realizar un desmonte físico donde inicialmente se retira el aluminio, las cajas de conexión y se realiza una recuperación directa sin tratamiento. Luego se realiza una trituración de los módulos quedando en pequeños trozos de entre 1 y 10 cm. Finalmente se hace una separación física de todos los materiales. Este método es el más económico, y requiere de una infraestructura relativamente sencilla para su implementación.

5.5. Infraestructura logística y cadena de valor para la disposición final

Las técnicas de gestión al final de la vida se agrupan en: (i) procesos mecánicos orientados a recuperar vidrio y aluminio; (ii) procesos térmicos útiles para liberar encapsulantes; y (iii) procesos químicos para extraer materiales semiconductores de alta pureza (Huang, Li, & Xu, 2022). Métodos híbridos combinan etapas anteriores para mejorar la recuperación de materiales y minimizar residuos secundarios (Al Amin bin Mohamed Sultan et al., 2025).

5.6. Marco regulatorio y políticas públicas aplicables

En Colombia desde el año 2014 se dio inicio a la construcción de un marco regulatorio para la implementación de energías renovables en el país mediante la Ley 1715 de 2014, la cual promueve la adopción de tecnologías limpias. Esta ley aborda de manera particular tres aspectos; promoción y regulación de las energías renovables no convencionales en el país, incentivos tributarios y financieros, integración de energías al Sistema Interconectado Nacional (SIN), y Gestión eficiente de la energía. Sin embargo, no aborda de manera integral la gestión del fin de vida de los módulos fotovoltaicos (UPME, 2024). Instrumentos recomendables incluyen la responsabilidad extendida del productor, incentivos para plantas de reciclaje, normativas de trazabilidad y mecanismos de financiación (MinAmbiente, 2023; DANE, 2024).

En lo referente a medio ambiente, Colombia cuenta con la ley 1672 de 2013, mediante la cual se establece la política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones. Respecto al uso final de paneles solares, esta ley apenas establece que “los productores son responsables de organizar y financiar la recolección selectiva y gestión ambiental segura de los RAEE que generen sus productos al final de la vida útil” (Congreso de la República de Colombia, 2013)

5.7. Desafíos técnicos de integración con sistemas de almacenamiento (BESS)

Aunque el foco central del estudio es la gestión de paneles al final de su vida, la expansión simultánea de sistemas de almacenamiento influye en la configuración de instalaciones y en la necesidad de procedimientos diferenciados de disposición (Razmjoo et al., 2024). Las

baterías, predominantemente de ion-litio, requieren trazabilidad, manejo especializado y protocolos de seguridad (MinEnergía, 2025; UPME, 2024).

5.8. Implicaciones económicas: costos, incentivos y modelos de financiamiento

La evaluación de costos de una cadena de gestión integral incluye capital fijo, costos operativos y logísticos (XM, 2025; DANE, 2024). Los ingresos provienen de la venta de materiales recuperados y de incentivos regulatorios (UPME, 2024). Modelos de financiamiento público-privado y esquemas de depósito/reintegro son alternativas para internalizar costos (Chowdhury et al., 2023; MinAmbiente, 2023).

5.9. Impactos ambientales y socioeconómicos de una gestión inadecuada vs circular

La disposición inadecuada de paneles puede provocar liberación de sustancias nocivas y pérdidas de recursos valiosos (Green Alliance, 2021). En contraste, una gestión circular reduce demanda de materia prima virgen, genera empleo y contribuye a metas de sostenibilidad (Rodríguez & Pérez, 2024). Evaluaciones de ciclo de vida (LCA) permiten cuantificar beneficios netos (IRENA, 2016; MinAmbiente, 2023).

5.10. Buenas prácticas internacionales y lecciones aplicables a Colombia

Experiencias en la Unión Europea, Japón y Australia muestran que la combinación de REP, normativas WEEE y alianzas público-privadas ha facilitado la creación de infraestructura de reciclaje (European Parliament, 2012; Marwede et al., 2021). Para Colombia, estas prácticas deben adaptarse al contexto local (UPME, 2024; MinEnergía, 2025).

5.11. Vacíos de conocimiento y prioridades de investigación

Se identifican vacíos en datos sobre flujos futuros de residuos, análisis de viabilidad de plantas y metodologías para recuperación de silicio (Huang et al., 2022; Chowdhury et al., 2023). Priorizar estudios piloto y herramientas de modelado permitirá reducir incertidumbres y facilitar decisiones regulatorias (UPME, 2024).

5.12. Conclusión del marco teórico

La consolidación de una política nacional para el uso final de paneles solares requiere adaptación regulatoria, inversión en infraestructura, instrumentos económicos y líneas de investigación aplicadas (UPME, 2024; MinEnergía, 2025; MinAmbiente, 2023).

6. Marco Metodológico

En este capítulo se detalla la metodología empleada para abordar la investigación sobre la gestión del uso final de paneles solares fotovoltaicos y sus sistemas asociados. Se ha seleccionado un enfoque metodológico mixto considerando que la investigación aborda aspectos regulatorios, técnicos, económicos y ambientales. El enfoque mixto permite una comprensión integral de todos los aspectos de estudio, la identificación de los principales obstáculos para la implementación de un sistema de gestión integral, hasta la evaluación de las mejores prácticas y tecnologías existentes hasta ahora. A continuación se describe con detalle el objetivo del estudio de investigación, selección del método, la población seleccionada y el tipo de muestras, las técnicas de recopilación de datos, el procedimiento a seguir y las consideraciones éticas a tener en cuenta.

6.1. Tipo de estudio

La presente investigación se encuentra orientada a generar conocimiento que pueda ser empleado para solucionar el problema específico planteado en la pregunta de investigación, referente a los desafíos regulatorios, técnico y económicos que enfrenta Colombia para la implementación de un sistema integral que permita un adecuado uso final de paneles solares fotovoltaicos. Aunque en la actualidad esta no es una problemática, si lo será en un par de siglos cuando los paneles solares empleados en los primeros proyectos desarrollados en Colombia lleguen a su ciclo de vida final. Este estudio busca expandir los límites del conocimiento sin un fin práctico inmediato, centrándose en la identificación de soluciones viables y adaptables al contexto colombiano.

Este estudio adopta un carácter exploratorio – descriptivo. Exploratorio en la medida en que el campo de la gestión de residuos de paneles solares es relativamente nuevo en Colombia, y existe muy poca información sistematizada sobre la gestión integral de este tipo de residuos, las tecnologías de reciclaje disponibles y el marco regulatorio requerido para la correcta implementación en el país. En tal sentido, la investigación busca identificar los principales desafíos y oportunidades que enfrenta el país para el adecuado desarrollo del sistema de gestión integral.

En cuanto al carácter descriptivo, el objetivo es elaborar una representación detallada y sistemática de la situación de la situación actual en lo referente a la gestión de residuos de paneles en Colombia. La descripción abarcará varios aspectos clave, iniciando por los flujos de residuos. En primer lugar se buscará cuantificar y detallar los volúmenes de paneles solares que se espera lleguen a su vida útil en las siguientes dos décadas, ello debe contemplar el detalle del tipo de paneles, su composición, la ubicación geográfica de acuerdo a las zonas del país con mayor implementación de proyectos solares, entre otros aspectos. Otro aspecto a documentar, son las tecnologías de reciclaje existentes en la actualidad, las cuales han sido desarrolladas a nivel internacional, analizando la eficiencia, los costos, los beneficios y desventajas.

La investigación también debe identificar a todos los actores de la cadena de valor, partiendo por los fabricantes, importadores, distribuidores, usuarios finales, así como las empresas dedicadas a la gestión de residuos. Ello va a permitir describir los roles de cada uno y las responsabilidades que se deben asignar, mediante la regulación que debe ser construida por el gobierno nacional en el futuro.

6.2. Enfoque de Investigación

Para abordar la complejidad del tema de investigación, se ha adoptado un enfoque mixto que combina métodos cualitativos y cuantitativos. Este enfoque reconoce que tanto los datos numéricos como las perspectivas subjetivas de los actores involucrados son esenciales para una comprensión del problema planteado.

Los métodos cualitativos, como las entrevistas a realizar a expertos y el análisis de documental, permitirán explorar en profundidad las percepciones, experiencias y conocimientos de los diferentes actores involucrados en la gestión de residuos de paneles solares. Estos métodos son especialmente útiles para identificar los desafíos y oportunidades que no son fácilmente cuantificables, como las barreras culturales, la falta de información y la complejidad de los procesos regulatorios.

El enfoque cuantitativo se llevará a cabo mediante encuestas y el análisis de datos estadísticos, permitirán cuantificar la magnitud del problema, identificar tendencias y patrones, y evaluar el impacto de diferentes políticas y estrategias de gestión. Este método será especialmente útil para obtener una visión general del problema y comparar diferentes alternativas de gestión de este tipo de residuos.

6.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación se basa en un estudio de caso centrado en el contexto colombiano. El estudio de caso es una estrategia de investigación que permite examinar en

profundidad un fenómeno complejo dentro de su contexto real. En este caso, el fenómeno de interés es la gestión de residuos de paneles solares en Colombia, y el contexto incluye las políticas públicas, las condiciones económicas, las tecnologías disponibles y las prácticas culturales relevantes.

Si bien el estudio se centra en el caso colombiano, también se tomarán en cuenta experiencias internacionales relevantes, especialmente de países que han desarrollado sistemas de gestión de residuos de paneles solares más avanzados. Estas experiencias servirán como punto de referencia para identificar las mejores prácticas y adaptar soluciones al contexto colombiano.

Adicionalmente, se realizará una exhaustiva investigación documental para analizar las leyes, regulaciones, informes técnicos y estudios previos relacionados con la gestión de residuos de paneles solares. Esta investigación permitirá identificar las fortalezas y debilidades del marco regulatorio existente, así como las áreas donde se requiere mayor investigación y desarrollo.

6.4. Población de Muestra

La población objetivo para la investigación está conformada por todos los actores involucrados en el ciclo de vida de los paneles solares en Colombia.

- Importadores
- Distribuidores
- Constructores de proyectos solares
- Ministerio de Minas y Energía
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)
- Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG)
- Compañías para la gestión de residuos
- Investigadores y expertos en el tema
- Usuarios finales

Dada la diversidad y dispersión de la población, se utilizará un muestreo no probabilístico, este método es útil por ser rápido y la selección de la muestra es a juicio del investigador. Este método fue seleccionado intencionalmente para aquellos actores que dentro de la investigación sean considerados más relevantes para responder a los objetivos de la investigación. Se buscará incluir representantes de cada uno de los grupos mencionados anteriormente, asegurando una diversidad de perspectivas y experiencias. El tamaño de la muestra se determinará en función de la saturación de la información, es decir, cuando se considere que se ha recopilado suficiente información para responder a las preguntas de investigación.

6.5. Instrumentos y técnicas de recolección de datos

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, se requiere de una estrategia de recolección de datos robusta y diversificada, que permita obtener información relevante desde diferentes fuentes y perspectivas. A continuación, se describen los instrumentos y técnicas que se utilizarán para recopilar la información necesaria, detallando su propósito, alcance y procedimientos de aplicación:

- **Revisión documental:** Se realizará una revisión exhaustiva de la regulación colombiana, políticas públicas, estudios técnico literatura académica relacionada con la gestión de residuos de paneles solares. El propósito de esta revisión es identificar el marco regulatorio existente, las políticas públicas relevantes, las tecnologías de reciclaje disponibles y las mejores prácticas a nivel nacional e internacional. Se analizarán leyes, decretos, resoluciones, informes de gobierno, estudios de mercado, artículos científicos y otros documentos relevantes. El alcance de esta revisión abarcará tanto fuentes primarias (leyes y regulaciones) como fuentes secundarias (estudios e informes). El procedimiento consistirá en la búsqueda sistemática de documentos relevantes en bases de datos especializadas, bibliotecas y sitios web gubernamentales, seguida de la lectura y análisis crítico de la información encontrada.
- **Entrevistas semiestructuradas:** Se realizarán entrevistas a profundidad con expertos en el sector (reguladores, empresas de gestión de residuos, investigadores) para identificar desafíos, oportunidades y mejores prácticas. El propósito de estas entrevistas es obtener información detallada sobre las percepciones, experiencias y conocimientos de los actores clave en la gestión de residuos de paneles solares. Las entrevistas serán semiestructuradas, lo que significa que se utilizará una guía de preguntas predefinida, pero se permitirá flexibilidad para explorar temas emergentes. El alcance de las entrevistas abarcará temas como el marco regulatorio, las tecnologías de reciclaje, los costos y beneficios de la gestión de residuos, y las barreras y facilitadores para la implementación de un sistema integral. El procedimiento consistirá en la selección de los expertos, el contacto y la programación de las entrevistas, la realización de las entrevistas siguiendo la guía

de preguntas, la grabación de las entrevistas (con el consentimiento de los participantes) y la transcripción y análisis de la información obtenida.

- Encuestas: Se diseñarán y aplicarán encuestas dirigidas a instaladores y generadores de energía para conocer sus prácticas actuales y percepciones sobre la gestión de residuos. El propósito de estas encuestas es obtener información cuantitativa sobre las prácticas de instalación y gestión de residuos de paneles solares, así como las percepciones de los instaladores y generadores sobre la problemática. Las encuestas incluirán preguntas cerradas (de opción múltiple, escala de Likert) y preguntas abiertas (para permitir a los participantes expresar sus opiniones y sugerencias). El alcance de las encuestas abarcará temas como el volumen de paneles solares instalados, las prácticas de gestión de residuos, los costos de gestión, las barreras para el reciclaje y las necesidades de capacitación. El procedimiento consistirá en el diseño del cuestionario, la selección de la muestra de instaladores y generadores, la distribución de las encuestas (en línea o en papel), la recolección de las encuestas y el análisis estadístico de los datos.

- Análisis de datos secundarios: Se utilizarán datos estadísticos sobre la importación, instalación y vida útil de paneles solares en Colombia, provenientes de fuentes oficiales (DANE, UPME, Ministerio de Minas y Energía) y de estudios de mercado. El propósito de este análisis es cuantificar la magnitud del problema de los residuos de paneles solares y analizar las tendencias en la importación, instalación y vida útil de estos dispositivos. El alcance del análisis abarcará datos sobre el volumen de paneles solares importados, el número de instalaciones, la capacidad instalada, la vida útil promedio de los paneles y las proyecciones de crecimiento del mercado. El procedimiento consistirá en la búsqueda de datos en fuentes oficiales y estudios de mercado, la organización y limpieza de los datos, y el análisis estadístico de la información utilizando herramientas como hojas de cálculo y software estadístico.

6.6. Procedimiento

El procedimiento de investigación se desarrollará en las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica: Se recopilará y analizará la información relevante sobre la gestión de residuos de paneles solares a nivel nacional e internacional.
2. Diseño de instrumentos: Se elaborarán las guías de entrevista y los cuestionarios de encuesta, adaptándolos a los diferentes grupos de interés.
3. Selección de participantes: Se identificarán y contactarán a los expertos y representantes clave de cada grupo, invitándolos a participar en la investigación.

4. Recolección de datos: Se aplicarán las entrevistas y encuestas, siguiendo un protocolo estandarizado para garantizar la calidad de la información.

5. Análisis de datos: Se analizarán los datos cualitativos (entrevistas) y cuantitativos (encuestas y datos secundarios), utilizando técnicas adecuadas para cada tipo de información.

6. Triangulación: Se compararán los resultados de las diferentes fuentes de datos para validar y enriquecer los hallazgos.

7. Elaboración de propuestas: Se desarrollarán recomendaciones para la implementación de un sistema de gestión integral de residuos de paneles solares en Colombia, basadas en los resultados de la investigación.

7. Análisis de Datos

El análisis de los datos se realizará utilizando tanto técnicas cualitativas como cuantitativas. El análisis cualitativo se centrará en el análisis de contenido de las entrevistas, buscando identificar temas recurrentes, patrones y relaciones entre los diferentes actores. Se utilizará software de análisis cualitativo (ej., Atlas.ti, NVivo) para facilitar la codificación y el análisis de la información.

El análisis cuantitativo se centrará en el análisis estadístico descriptivo de los datos de las encuestas y los datos secundarios. Se calcularán frecuencias, porcentajes, promedios y otras medidas estadísticas para resumir y describir la información. Se utilizará software estadístico (ej., SPSS, R) para realizar los análisis.

La combinación de ambos tipos de análisis permitirá obtener una comprensión más completa y profunda del problema de investigación.

8. Consideraciones Éticas

Se solicitará el consentimiento informado de todos los participantes, explicándoles los objetivos de la investigación, los riesgos y beneficios de su participación, y su derecho a retirarse en cualquier momento. Se garantizará el anonimato y la confidencialidad de los datos, protegiendo la identidad de los participantes y utilizando la información únicamente para los fines de la investigación. Se presentarán los resultados de manera transparente y objetiva, evitando cualquier sesgo o manipulación de la información.

Además, se solicitarán los permisos necesarios a las instituciones y organizaciones involucradas en la investigación, asegurando el cumplimiento de las normas y regulaciones aplicables.

9. Conclusiones

La presente investigación, centrada en el "Análisis de Uso Final de Paneles Solares y Sistemas de Almacenamiento de Energía en Colombia", ha permitido establecer un panorama claro de los desafíos y oportunidades inherentes a la gestión del fin de vida útil de la tecnología fotovoltaica en el contexto nacional. A partir de los objetivos generales y específicos propuestos, se desprenden las siguientes conclusiones.

➤ **Desafío crítico para la sostenibilidad energética**

Colombia se enfrenta a un desafío ambiental, técnico y económico inminente, derivado de la masificación acelerada de la energía solar fotovoltaica. El crecimiento exponencial de la capacidad instalada, con proyecciones que la sitúan en 19.80 GW para 2030, augura una acumulación masiva de residuos de paneles solares en las próximas dos décadas, una vez superen su vida útil de 25-30 años. Este escenario, sin una planificación y gestión adecuada, representa un riesgo significativo de contaminación ambiental y pérdida de recursos valiosos, contradiciendo los principios de sostenibilidad que impulsan la transición energética.

➤ **Brechas del marco regulatorio para el Uso Final de Paneles Solares Fotovoltaicos:**

El análisis del marco regulatorio existente confirma una de las hipótesis centrales de esta investigación: aunque Colombia ha avanzado en la promoción de energías renovables (Ley 1715 de 2014) y la gestión de residuos electrónicos en general (Ley 1672 de 2013), existe una **brecha regulatoria sustancial y específica** para los paneles solares fotovoltaicos. La Ley 1672 establece la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), pero no se ha ahondado ni adaptado con el nivel de detalle necesario para las particularidades de los paneles solares. Esta falta de una regulación desincentiva la inversión en infraestructura de reciclaje y dificulta la creación de una cadena de valor para la disposición final, dejando la responsabilidad en una zona gris y limitando la trazabilidad.

➤ **Viabilidad Técnica para el Uso Final de Paneles Solares, sin infraestructura actual**

La caracterización de los procesos y tecnologías de reciclaje ha demostrado que, desde una perspectiva técnica, es factible recuperar los componentes valiosos de los paneles solares (vidrio, aluminio, silicio, metales preciosos). Los procesos mecánicos son los más accesibles y económicamente viables a corto plazo, requiriendo una infraestructura

relativamente sencilla. Sin embargo, Colombia carece actualmente de la infraestructura logística y las plantas de reciclaje especializadas a la escala necesaria para procesar los volúmenes proyectados. Las tecnologías más avanzadas (térmicas y químicas), si bien ofrecen mayores tasas de recuperación de materiales puros, presentan barreras significativas en términos de eficiencia, costos energéticos y requerimientos ambientales para su implementación a gran escala en un país en desarrollo.

➤ **Desafíos Económicos como Barrera para la Implementación**

La evaluación de los desafíos económicos subraya que la implementación de un sistema de gestión integral para el reciclaje de paneles solares conlleva costos significativos de inversión inicial y operación. Si bien la recuperación de materiales ofrece un potencial de ingresos, estos no son siempre suficientes para cubrir los costos sin el apoyo de incentivos regulatorios o modelos de financiamiento innovadores. La ausencia de un mercado robusto para los materiales reciclados y la necesidad de establecer una infraestructura logística eficiente desde el punto de vista de costos son factores económicos críticos que requieren atención prioritaria para asegurar la sostenibilidad del sistema.

➤ **Necesidad de una Propuesta Metodológica Holística que se Adapte al Contexto**

La investigación concluye la imperiosa necesidad de formular una propuesta metodológica que aborde la disposición final de paneles solares de manera integral. Dicha propuesta debe ser el resultado de un análisis riguroso que considere la interconexión de los aspectos regulatorios, técnicos, económicos, ambientales y sociales, adaptándose a las particularidades geográficas y socioeconómicas de Colombia. El enfoque mixto de investigación propuesto (cualitativo y cuantitativo) y la incorporación de experiencias internacionales relevantes son elementos clave para construir una hoja de ruta factible y escalable, que permita transitar hacia una verdadera economía circular en el sector fotovoltaico.

10. Recomendaciones

Para asegurar una gestión integral y sostenible del fin de vida útil de los paneles solares y sistemas de almacenamiento en Colombia, se recomiendan las siguientes acciones estratégicas:

1. Desarrollo de un Marco Normativo Específico (Proyecto "Marco Normativo PV-Circular"):

Crear una regulación clara y mandatoria que establezca la **Responsabilidad Extendida del Productor (REP)** para paneles solares y sus respectivos sistemas de almacenamiento.

Definir metas de recolección y reciclaje, junto con un sistema de trazabilidad y reporte, apoyado por incentivos y sanciones.

2. Desarrollo de Infraestructura y Capacidades de Reciclaje (Proyecto "Red Nacional de Reciclaje PV"):

Establecer **centros de acopio y pretratamiento regionales** para paneles solares, comenzando con procesos mecánicos.

Evaluar y desarrollar **plantas de reciclaje avanzado** a mediano plazo, mediante estudios de factibilidad y transferencia tecnológica.

Capacitar al personal técnico en el manejo seguro y eficiente de los residuos.

3. Diseño de Mecanismos de Financiamiento Sostenibles (Proyecto "Fondo PV-Circular Sostenible"):

Crear un **fondo fiduciario** financiado por contribuciones (eco-tasas) por cada panel/BESS vendido o importado.

Explorar **esquemas de depósito-reintegro** e implementar incentivos fiscales para la inversión en reciclaje.

Fomentar **alianzas público-privadas** para la inversión y operación de la infraestructura necesaria.

4. Integración y Sinergia con la Gestión de Sistemas de Almacenamiento (Proyecto "Estrategia BESS-Circular"):

Desarrollar una estrategia paralela y complementaria para la gestión del fin de vida útil de las baterías (BESS), incluyendo su normativa específica y protocolos de seguridad.

5. Fomento de la Investigación, Innovación y Colaboración (Programa "PV-Investiga y Colabora"):

Invertir en **investigación aplicada** sobre flujos de residuos, nuevas tecnologías de recuperación y adaptación local.

Establecer **plataformas de colaboración** intersectoriales y alianzas internacionales para el intercambio de conocimientos y mejores prácticas.

Realizar **campañas de sensibilización** para usuarios finales y la sociedad en general sobre la importancia de la disposición adecuada.

11. Referencias

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024). Informe de gestión 2023–2024. UPME.

Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía). (2025). Informe de capacidad instalada de energías renovables en Colombia 2025. MinEnergía.

XM. (2025). Reporte integral de desempeño 2024. XM administradores del mercado eléctrico.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024). Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Energía (CAE-FE) 2022–2023 (provisional). DANE.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (2023). Estrategia Nacional de Economía Circular. MinAmbiente.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels. IRENA.

Chowdhury, M., Hossain, S., & Islam, M. (2023). Recycling approaches for photovoltaic modules: Challenges and opportunities. *Renewable Energy Reviews*, 174, 113048.

Al Amin bin Mohamed Sultan, M., Lim, J., & Mativenga, P. (2025). Photovoltaic waste management: materials recovery and recycling technologies. *Journal of Cleaner Production*, 432, 139876.

Huang, W., Li, Y., & Xu, H. (2022). Hybrid recycling processes for crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 241, 111732.

Razmjoo, A., et al. (2024). Moving toward the expansion of energy storage systems: integration and policy aspects. *Sustainability*.

Congreso de la República de Colombia. (2013). *Ley 1672 de 2013: Por la cual se establece la política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 48.830. Bogotá, Colombia.

Recuperado

de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53616>

