



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Diseño de un protocolo integral para la evaluación,
clasificación y disposición final de paneles solares al
término de su vida útil

Luis Alberto Tapias Herrera

Director

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

3 de julio de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado
en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana para optar al
título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Carrera Ingeniería Electrónica

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Trabajo de Grado

Dr.
Jurado 1

Dr.
Jurado 2

Santiago de Cali, 3 de julio de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Diseño de un protocolo integral para la evaluación, clasificación y disposición final de paneles solares al término de su vida útil”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Luis Alberto Tapias Herrera

Santiago de Cali, 3 de julio de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado “Diseño de un protocolo integral para la evaluación, clasificación y disposición final de paneles solares al término de su vida útil”, realizado por Luis Alberto Tapias Herrera, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

Este trabajo de grado representa no solo un esfuerzo académico, sino también un recorrido personal lleno de aprendizajes, desafíos y crecimiento. Su culminación no habría sido posible sin el apoyo y la presencia de personas que han marcado profundamente este camino.

A mi familia, por su amor incondicional, su ejemplo y por enseñarme el valor de la disciplina y la constancia. Cada palabra de apoyo y cada gesto de confianza fueron fundamentales para avanzar incluso en los momentos más exigentes.

A Angie Ríos, mi compañera de vida, por su paciencia, comprensión y por creer en mí cuando las dificultades parecían mayores. Gracias por acompañarme con serenidad, motivarme en los días de cansancio y celebrar conmigo cada pequeño avance.

A mi hijo, Santiago Tapias, cuya llegada transformó mi vida y se convirtió en una fuente inagotable de motivación. Aunque aún es muy pequeño, su presencia me impulsó a dar lo mejor de mí y a culminar este proyecto con el deseo de construir un futuro del cual él pueda sentirse orgulloso.

A mi mejor amigo, Juan Rengifo, por su amistad sincera, por estar presente en los momentos complejos y por recordarme siempre la importancia de persistir. Su apoyo leal fue esencial en todo este proceso.

A mi director de trabajo de grado, por su orientación, exigencia académica y rigor técnico. Su acompañamiento y retroalimentación fueron determinantes para la calidad y la solidez de este proyecto.

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por brindarme la formación académica y humana que hizo posible este camino. La exigencia, calidad docente y acompañamiento institucional contribuyeron de manera profunda a mi desarrollo profesional y personal.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron motivación, ideas o palabras de aliento durante este camino. Cada gesto, por pequeño que pareciera, contribuyó a que hoy este logro sea posible.

Este proyecto es el reflejo del esfuerzo colectivo de quienes caminaron conmigo.

Glosario

Acrónimos y Abreviaturas

<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission.
<i>RAEE</i>	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.
<i>PV</i>	Photovoltaic, relativo a la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica.
<i>STC</i>	Standard Test Conditions (1000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5).
<i>P_{max}</i>	Potencia máxima entregada por el módulo bajo condiciones de operación o ensayo.
<i>V_{oc}</i>	Tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico.
<i>I_{sc}</i>	Corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico.
<i>FF</i>	Factor de forma, indicador de la calidad eléctrica del módulo.
<i>EVA</i>	Ethylene Vinyl Acetate, material encapsulante de las celdas solares.
<i>PID</i>	Potential Induced Degradation, degradación inducida por potencial eléctrico.
<i>CdTe</i>	Telururo de Cadmio (Cadmium Telluride).
<i>CIGS</i>	Cobre–Indio–Galio–Selenio.
<i>Pb</i>	Plomo (Lead).

Términos

<i>Vida útil</i>	Periodo durante el cual un módulo fotovoltaico mantiene condiciones mínimas de seguridad, desempeño eléctrico y estabilidad estructural para su operación.
<i>Fin de vida útil</i>	Etapas en la cual un panel fotovoltaico deja de cumplir los requisitos técnicos, eléctricos o normativos para su operación segura o eficiente.
<i>Inspección física</i>	Evaluación visual y mecánica del estado estructural del módulo, incluyendo vidrio, marco, encapsulante, backsheet y caja de conexiones.
<i>Diagnóstico eléctrico</i>	Conjunto de pruebas destinadas a evaluar el comportamiento eléctrico del módulo mediante la medición de parámetros como P_{max} , V_{oc} , I_{sc} y curva I-V.
<i>Reacondicionamiento</i>	Proceso de intervención técnica orientado a corregir fallas localizadas en el módulo fotovoltaico con el fin de extender su vida útil y recuperar parcialmente su desempeño.
<i>Reutilización</i>	Uso posterior de un módulo fotovoltaico que conserva condiciones funcionales adecuadas, sin requerir procesos de reparación significativa.
<i>Reciclaje</i>	Proceso de recuperación de materiales constitutivos del módulo fotovoltaico, tales como vidrio, aluminio y metales conductores, al final de su vida útil.
<i>Matriz multicriterio</i>	Herramienta de evaluación que integra criterios físicos, eléctricos y de reparabilidad mediante ponderaciones y puntajes para la clasificación técnica del módulo.
<i>RAEE peligroso</i>	Categoría de residuo que contiene materiales potencialmente tóxicos o contaminantes, requiriendo manejo especializado conforme a la normativa ambiental vigente.
<i>Economía circular</i>	Modelo de gestión orientado a prolongar el ciclo de vida de los productos, reducir residuos y maximizar el aprovechamiento de materiales y recursos.

Resumen

El acelerado crecimiento de la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial y nacional plantea un desafío emergente asociado a la gestión de los módulos solares al final de su vida útil. En Colombia, la ausencia de lineamientos técnicos específicos para la evaluación y clasificación de estos residuos dificulta la toma de decisiones sobre su reutilización, reparación, reciclaje o disposición final como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un protocolo técnico para la evaluación, clasificación y disposición final de paneles fotovoltaicos, integrando criterios físicos, eléctricos, materiales y normativos, y articulándolo con el marco regulatorio colombiano y las recomendaciones internacionales vigentes [1, 2, 3, 4].

El protocolo propuesto se estructura en tres etapas secuenciales: inspección física, diagnóstico eléctrico y evaluación ambiental mediante una matriz multicriterio, apoyadas por diagramas de flujo que garantizan un proceso reproducible y trazable. A partir del análisis metodológico y de la revisión técnico-científica, se demuestra que la aplicación de este enfoque permite identificar el potencial de reutilización, reparación o reciclaje de los módulos fotovoltaicos, priorizando la extensión de su vida útil y el aprovechamiento de materiales valorizables. El trabajo contribuye a fortalecer la gestión ambientalmente responsable de los residuos fotovoltaicos en Colombia y se alinea con los principios de economía circular promovidos por organismos internacionales como IRENA y la Directiva Europea WEEE [1, 2, 3, 5].

Abstract

The accelerated growth of installed photovoltaic capacity worldwide and in Colombia poses an emerging challenge related to the management of solar modules at the end of their useful life. In Colombia, the lack of specific technical guidelines for the evaluation and classification of these residues hinders decision-making processes regarding reuse, repair, recycling, or final disposal as waste electrical and electronic equipment (WEEE). In this context, this work aims to develop a technical protocol for the evaluation, classification, and final disposition of photovoltaic panels, integrating physical, electrical, material, and regulatory criteria, and aligning it with the Colombian regulatory framework and current international recommendations [1, 2, 6, 7].

The proposed protocol is structured into three sequential stages: physical inspection, electrical diagnosis, and environmental assessment through a multicriteria matrix, supported by flow diagrams that ensure a reproducible and traceable process. Based on methodological analysis and a technical–scientific literature review, the study demonstrates that this approach enables the identification of reuse, repair, or recycling potential in photovoltaic modules, prioritizing life extension and the recovery of valuable materials. The proposed framework contributes to strengthening the environmentally responsible management of photovoltaic waste in Colombia and is aligned with circular economy principles promoted by international organizations such as IRENA and the European WEEE Directive [1, 2, 6, 8].

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción	1
2	Planteamiento del Problema	3
3	Justificación	5
4	Objetivos	7
4.1	Objetivo General	7
4.2	Objetivos Específicos	7
5	Marco de Referencia	9
5.1	Áreas Temáticas	9
5.2	Marco Teórico	9
5.2.1	Fundamentos técnicos de los módulos fotovoltaicos	9
5.2.2	Técnicas de diagnóstico aplicadas a módulos fotovoltaicos	13
5.2.3	Economía circular y ciclo de vida (LCA)	17
5.2.4	Directiva WEEE (Unión Europea)	18
5.2.5	Programas internacionales (IEA-PVPS, IRENA)	18
5.2.6	Normativa y contexto latinoamericano	18
5.2.7	Vacíos y desafíos normativos	19
5.3	Trabajos Relacionados	19
5.3.1	Proyecto colombiano sobre gestión de RAEE en paneles fotovoltaicos	19
5.3.2	Planta de tratamiento de paneles fotovoltaicos en Puertollano (España)	19
5.3.3	Proyecto PHOTORAMA (Horizonte 2020) — Economía circular para residuos fotovoltaicos	20
5.3.4	Cierre del marco de referencias	20
6	Materiales y Métodos	21
6.1	Tipo de estudio	22
6.2	Estructura metodológica general	22
6.3	1. Identificación del problema y revisión técnico-científica	22
7	Resultados y Discusión	49
7.1	Resultados de la clasificación técnica integrada	49
7.2	Análisis técnico por categoría de clasificación	49
7.2.1	Paneles clasificados como operativos	49
7.2.2	Paneles clasificados como reparables	50
7.2.3	Paneles clasificados como irrecuperables	50

7.2.4	Paneles clasificados como RAEE peligroso	50
7.3	Integración del protocolo con principios de economía circular	50
7.4	Discusión comparada con experiencias internacionales	51
7.5	Clasificación técnica resultante y rutas de disposición	51
7.6	Análisis de costos de disposición final	52
7.7	Conclusiones del análisis de resultados	53
8	Conclusiones	55
9	Recomendaciones	57
9.1	Propuesta detallada de plan piloto de validación	58
10	Anexos	61
Anexos		61
10.1	Anexo 1 – Formato detallado de aplicación del protocolo técnico para paneles solares	62
10.2	Anexo 2 – Guía paso a paso para la aplicación de los diagramas de flujo	65
Bibliografía		67

Índice de figuras

5.1	Esquema de la unión p–n en una celda fotovoltaica, mostrando la formación del campo eléctrico interno y el sentido del flujo de portadores de carga bajo iluminación. . . .	10
5.2	Estructura física típica de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino.	12
6.1	Ejemplo de microfisuras (<i>microcracks</i>) en celdas fotovoltaicas, evidenciadas como fracturas internas que afectan el desempeño eléctrico del módulo.	23
6.2	Imagen termográfica de puntos calientes (<i>hot-spots</i>) en módulos fotovoltaicos, donde se evidencian incrementos localizados de temperatura asociados a fallas eléctricas internas.	24
6.3	Curva característica corriente–voltaje (I–V) y curva de potencia de una celda solar fotovoltaica, donde se identifican la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (P_m) y el factor de forma (FF). .	26
6.4	Inspección física del módulo fotovoltaico	41
6.5	Diagnóstico eléctrico del módulo fotovoltaico	44
6.6	Proceso 3: Evaluación ambiental y decisión final mediante matriz multicriterio	45

Índice de cuadros

5.1	Parámetros técnicos del ensayo de electroluminiscencia	15
5.2	Criterios de interpretación de la imagen de electroluminiscencia	16
5.3	Comparación de las técnicas de diagnóstico empleadas en el protocolo	17
6.1	Comparación de las variables eléctricas del protocolo	27
6.2	Umrales eléctricos adoptados para la clasificación de módulos fotovoltaicos	29
6.3	Comparación del umbral adoptado con criterios reportados en la literatura	31
6.4	Matriz de decisión técnica integrada al protocolo	36
6.5	Síntesis de variables, unidades de medida y pesos de la matriz multicriterio	38
6.6	Resumen técnico de las etapas del protocolo de evaluación de paneles solares	46
7.1	Clasificación técnica resultante y rutas de disposición recomendadas	51
7.2	Estructura referencial de costos de disposición final y reciclaje de paneles fotovoltaicos	52
9.1	Cronograma propuesto para el plan piloto de validación del protocolo	59
10.1	Formato guía para la aplicación del protocolo técnico de clasificación de paneles solares al final de su vida útil.	63

Introducción

1.1 Introducción

La transición energética y la expansión acelerada de las fuentes renovables han posicionado a la energía solar fotovoltaica como una de las principales alternativas para la diversificación de la matriz energética a nivel mundial. De acuerdo con organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y la Agencia Internacional de Energía (IEA-PVPS), la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos ha crecido de manera sostenida durante las últimas décadas, impulsada por la reducción de costos, los avances tecnológicos y las políticas de descarbonización [1, 2]. Este crecimiento, sin embargo, trae consigo un desafío emergente asociado a la gestión de los módulos fotovoltaicos una vez alcanzan el final de su vida útil.

Los paneles solares, diseñados para operar entre 20 y 30 años, experimentan procesos de degradación progresiva que afectan su desempeño eléctrico y su integridad estructural, tales como microfisuras, delaminación del encapsulante, corrosión de contactos, fallas en diodos bypass y pérdidas de potencia máxima [6, 4]. Como consecuencia, un número creciente de módulos es retirado de operación, generando un flujo de residuos que combina materiales de alto valor económico (vidrio, aluminio, cobre) con componentes potencialmente peligrosos, como plomo, cadmio o selenio, dependiendo de la tecnología de fabricación [3, 9].

En el contexto colombiano, la implementación de proyectos fotovoltaicos ha aumentado de forma significativa en los sectores residencial, comercial e industrial, apoyada por marcos normativos de fomento a las energías renovables. No obstante, la gestión de los módulos solares al final de su vida útil presenta vacíos técnicos y operativos, ya que la normativa vigente sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) no contempla lineamientos específicos para la evaluación técnica previa de los paneles fotovoltaicos [10]. Esta situación dificulta la toma de decisiones informadas sobre su reutilización, reparación, reciclaje o disposición final, y puede conducir al descarte prematuro de módulos aún funcionales o a un manejo inadecuado de materiales peligrosos.

Diversos estudios internacionales destacan la importancia de implementar procesos de clasificación técnica antes de definir la ruta de gestión de los módulos fotovoltaicos, señalando que una proporción significativa de los paneles retirados conserva niveles de funcionalidad que permiten su reacondicionamiento o reutilización [4, 5, 11]. Sin embargo, la ausencia de protocolos estandarizados adaptados al contexto local limita la transferencia de estas prácticas a países en desarrollo y restringe la aplicación efectiva de principios de economía circular en el sector fotovoltaico.

En este escenario, el presente trabajo propone el desarrollo de un protocolo técnico para la evaluación, clasificación y disposición final de paneles solares al término de su vida útil, integrando criterios físicos, eléctricos, materiales y normativos en un proceso estructurado y trazable. La propuesta busca aportar una herramienta técnica aplicable al contexto colombiano, que facilite

la toma de decisiones, fortalezca la gestión ambiental de los residuos fotovoltaicos y promueva el aprovechamiento eficiente de los recursos asociados a estas tecnologías.

Planteamiento del Problema

El crecimiento sostenido de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica a nivel mundial ha generado un desafío emergente asociado a la gestión de los módulos solares al final de su vida útil. De acuerdo con estimaciones de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), el volumen acumulado de residuos fotovoltaicos podría alcanzar entre 60 y 78 millones de toneladas hacia el año 2050, dependiendo de los escenarios de crecimiento y reemplazo tecnológico [1]. Este aumento representa un reto ambiental significativo si no se establecen mecanismos adecuados de clasificación, reutilización, reciclaje y disposición final.

Desde el punto de vista ambiental, los paneles solares contienen una combinación de materiales valorizables y componentes potencialmente peligrosos. Si bien la mayor proporción del módulo está compuesta por vidrio y aluminio, tecnologías como CdTe y CIGS incorporan elementos como cadmio, selenio, indio y plomo, los cuales pueden generar riesgos para la salud humana y los ecosistemas si no son gestionados de manera controlada [3, 9]. La disposición inadecuada de estos residuos puede provocar lixiviación de metales pesados, contaminación de suelos y cuerpos de agua, y emisiones asociadas a procesos de manejo no regulados.

En el ámbito tecnológico, numerosos estudios han evidenciado que una fracción relevante de los módulos retirados de operación no ha alcanzado una degradación total de su capacidad funcional. Investigaciones internacionales reportan que pérdidas de potencia inferiores al 20–30% no necesariamente implican el fin de la vida útil técnica del módulo, y que muchas fallas están asociadas a defectos localizados como diodos bypass dañados, microfisuras o problemas de interconexión [6, 4, 5]. No obstante, en la práctica, la falta de procedimientos de evaluación técnica estandarizados conduce al descarte prematuro de paneles que podrían ser reutilizados o reacondicionados.

En el contexto normativo, la gestión de residuos fotovoltaicos presenta vacíos significativos, especialmente en países donde el marco regulatorio sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) no contempla de manera explícita las particularidades de los módulos solares. En Colombia, si bien existen disposiciones generales para la gestión de RAEE, estas no establecen criterios técnicos específicos para la evaluación del estado físico, eléctrico o material de los paneles fotovoltaicos [10]. Esta ausencia de lineamientos dificulta la toma de decisiones técnicas homogéneas y limita la trazabilidad del manejo de estos residuos.

Adicionalmente, la falta de articulación entre los aspectos técnicos, ambientales y normativos genera incertidumbre en los actores del sector fotovoltaico, tales como instaladores, empresas de mantenimiento y gestores de residuos, quienes no cuentan con herramientas claras para determinar el destino adecuado de los módulos retirados. Esta situación puede derivar tanto en riesgos ambientales por un manejo inadecuado, como en la pérdida de oportunidades de aprovechamiento de materiales y extensión de la vida útil de los equipos.

En consecuencia, la gestión de los paneles solares al final de su vida útil se configura como una problemática multidimensional que involucra impactos ambientales, limitaciones tecnológicas y

vacíos normativos. La ausencia de criterios técnicos integrados para su clasificación y tratamiento dificulta la implementación de estrategias coherentes de gestión sostenible y representa un desafío creciente en el contexto del desarrollo de la energía solar fotovoltaica.

Justificación

Actualmente, la disposición final de los paneles solares carece de un protocolo técnico integral que permita evaluar su estado funcional y definir el destino más adecuado para cada unidad. Estos dispositivos, compuestos por materiales como silicio, vidrio, plásticos y metales pesados, presentan distintos grados de utilidad al finalizar su vida útil. Algunos paneles pueden ser reparados y reutilizados; otros, si bien ya no cumplen con los estándares de eficiencia industrial, podrían seguir operando en aplicaciones residenciales o rurales. Finalmente, aquellos que no puedan ser reutilizados deben ser gestionados adecuadamente, ya sea mediante reciclaje o disposición segura, para evitar daños ambientales y recuperar materiales valiosos.

Este problema se intensifica ante el crecimiento exponencial proyectado en los residuos solares. Según estimaciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA), para 2030 se acumularán cerca de 8 millones de toneladas de paneles fotovoltaicos desechados en todo el mundo, cifra que podría alcanzar los 78 millones de toneladas en 2050 [12]. En América Latina, se estima que para 2030 se generarán alrededor de 500.000 toneladas, con países como Chile, México y Brasil liderando esta acumulación [3]. Este escenario evidencia la urgencia de establecer estrategias técnicas claras y sostenibles para evitar que los beneficios ambientales de la energía solar se vean comprometidos por una inadecuada gestión de sus residuos.

En este contexto, el desarrollo de un protocolo que contemple la evaluación técnica del estado de los paneles, su reparación, reutilización o disposición final adecuada se presenta como una herramienta fundamental para maximizar su valor residual, reducir el impacto ambiental y fortalecer la sostenibilidad del sector solar. Este protocolo permitiría una gestión más racional de los materiales, fomentando la economía circular, extendiendo la vida útil de los dispositivos y abriendo nuevas oportunidades para su reaprovechamiento en contextos de menor exigencia. Además, enfrentar este desafío contribuirá directamente a consolidar la transición energética global hacia un modelo más justo y respetuoso con el medio ambiente. La implementación de estrategias concretas para la gestión de paneles solares al final de su ciclo de vida no solo garantiza una mayor eficiencia en el uso de los recursos, sino que refuerza el papel de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático.

En línea con lo anterior, Kumar, Bhattacharya y Sinha (2021) advierten que uno de los principales obstáculos para la gestión efectiva de los residuos fotovoltaicos es la ausencia de protocolos de clasificación técnica que orienten adecuadamente el destino de los módulos al final de su vida útil. En su revisión de técnicas de reciclaje mecánicas, térmicas y químicas, los autores concluyen que, sin un proceso previo de diagnóstico estructurado, la recuperación eficiente de materiales y componentes clave no puede ser garantizada [13].

Asimismo, este trabajo contribuye al fortalecimiento de la gestión ambiental en Colombia, alineándose con los compromisos internacionales de sostenibilidad y transición energética. La implementación del protocolo propuesto permitirá reducir el impacto ambiental, optimizar el uso de

materiales valiosos, generar oportunidades de reutilización y apoyar la formulación de políticas públicas sobre RAEE fotovoltaicos.

CAPÍTULO 4

Objetivos

4.1 Objetivo General

Diseñar un protocolo técnico para la evaluación, clasificación y disposición final adecuada de paneles solares al final de su vida útil, con base en criterios funcionales, materiales y ambientales.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales factores de deterioro físico, eléctrico y ambiental en paneles solares usados.
- Establecer criterios técnicos de clasificación para definir si un panel debe ser reutilizado, reparado, reciclado o dispuesto como residuo.
- Analizar la composición material de los paneles solares y sus implicaciones para la disposición final y reciclaje.
- Revisar protocolos y normativas nacionales e internacionales existentes sobre gestión de residuos fotovoltaicos.
- Proponer un protocolo técnico estructurado que integre procedimientos de diagnóstico, clasificación y disposición final de paneles solares, adaptable al contexto nacional.

Marco de Referencia

5.1 Áreas Temáticas

- Ingeniería de energía y potencia – Energías renovables – Generación de energía solar.
- Ingeniería de energía y potencia – Almacenamiento y conversión de energía – Sistemas fotovoltaicos.
- Ingeniería ambiental – Gestión de residuos – Reciclaje de residuos electrónicos.
- Computación y procesamiento de la información – Análisis de datos – Sistemas de apoyo a la toma de decisiones.
- Ingeniería de sistemas y teoría – Análisis y diseño de sistemas – Evaluación del ciclo de vida.

5.2 Marco Teórico

El análisis y la disposición de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil se sustentan en un conjunto de bases teóricas que integran principios de ingeniería eléctrica, ciencia de materiales, sostenibilidad y gestión ambiental de residuos tecnológicos. La evaluación de estos sistemas no puede abordarse únicamente desde un enfoque normativo o ambiental, sino que requiere una comprensión detallada de la estructura física del módulo, el funcionamiento de las celdas fotovoltaicas, las uniones semiconductor-metal y el comportamiento eléctrico bajo condiciones reales de operación.

Adicionalmente, los conceptos de economía circular y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) proporcionan el marco para la toma de decisiones sobre reutilización, reparación, reciclaje o disposición final de los paneles solares, considerando tanto su estado técnico como los posibles riesgos ambientales asociados a los materiales que los componen. A continuación, se presentan los principales referentes teóricos, técnicos y normativos que fundamentan el desarrollo de este trabajo.

5.2.1 Fundamentos técnicos de los módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos constituyen el elemento fundamental de los sistemas de conversión de energía solar en electricidad. Su función principal es transformar la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, fenómeno físico que ocurre en materiales semiconductores cuando son expuestos a la luz solar [14].

5.2.1.1 Principio de funcionamiento fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se basa en la generación de portadores de carga eléctricos al incidir fotones sobre un material semiconductor. Cuando la energía del fotón es mayor o igual a la energía de banda prohibida (*bandgap*) del semiconductor, se generan pares electrón-hueco. Estos portadores son separados y conducidos gracias a un campo eléctrico interno, produciendo una corriente eléctrica continua [15].

Este campo eléctrico se origina en la denominada **unión PN**, la cual se forma al contactar dos regiones de un semiconductor dopadas de manera diferente. La región tipo P presenta un exceso de huecos como portadores mayoritarios, mientras que la región tipo N presenta un exceso de electrones. En la interfaz entre ambas regiones se genera una zona de agotamiento libre de portadores, acompañada de un campo eléctrico interno que permite la separación de cargas generadas por la radiación solar [16]. Lo dicho anteriormente se puede detallar en la figura 5.1.

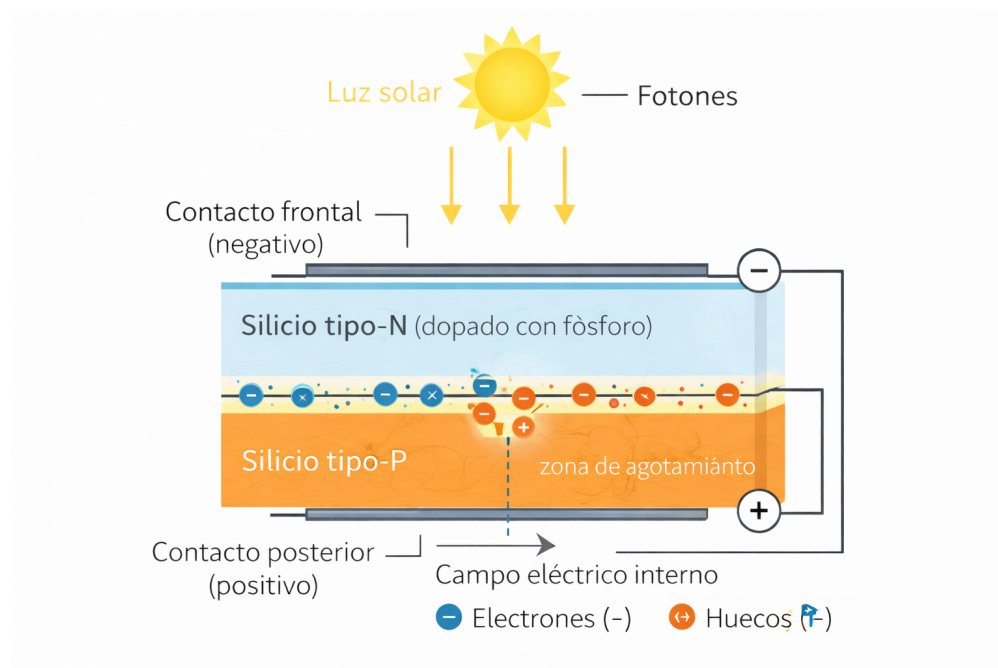


Figura 5.1: Esquema de la unión p-n en una celda fotovoltaica, mostrando la formación del campo eléctrico interno y el sentido del flujo de portadores de carga bajo iluminación.

Fuente: elaboración propia.

5.2.1.2 Celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son los dispositivos activos encargados de la conversión de energía. Las más utilizadas a nivel comercial son las celdas de silicio cristalino, que se dividen en dos categorías principales:

- **Silicio monocristalino:** presenta una estructura cristalina uniforme, mayor eficiencia (18–

23%) y mayor costo de fabricación.

- **Silicio policristalino:** compuesto por múltiples granos cristalinos, con eficiencias ligeramente menores (15–18%) y menor costo.

Además, existen tecnologías de película delgada como CdTe, CIGS y silicio amorfo, las cuales ofrecen ventajas en peso y flexibilidad, aunque generalmente presentan menores eficiencias y diferentes desafíos ambientales y de reciclaje [17].

Cada celda fotovoltaica entrega típicamente un voltaje del orden de 0.5 a 0.6 V en circuito abierto, por lo que es necesario interconectar múltiples celdas para alcanzar niveles aprovechables de tensión y potencia [17].

5.2.1.3 Interconexiones eléctricas y configuración del módulo

Las celdas fotovoltaicas se conectan eléctricamente mediante cintas conductoras metálicas (*busbars* y *ribbons*), formando arreglos en serie y paralelo. La conexión en serie incrementa el voltaje del módulo, mientras que la conexión en paralelo incrementa la corriente disponible.

Estas configuraciones determinan parámetros eléctricos clave del módulo, como la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el punto de máxima potencia (P_{mp}) y el factor de forma (*Fill Factor*). Alteraciones en las interconexiones, como microfisuras o soldaduras defectuosas, afectan directamente el desempeño eléctrico y la confiabilidad del módulo [18].

5.2.1.4 Estructura física del módulo fotovoltaico

Desde el punto de vista constructivo, un módulo fotovoltaico está compuesto por un conjunto de capas diseñadas para proteger las celdas y garantizar su funcionamiento seguro a largo plazo. La estructura típica incluye:

- **Vidrio templado frontal:** protege contra impactos, abrasión, radiación UV y agentes ambientales. Daños como fisuras o roturas comprometen el aislamiento eléctrico y la seguridad del módulo.
- **Encapsulante EVA (Ethylene Vinyl Acetate):** material polimérico responsable de fijar las celdas y proporcionar aislamiento eléctrico y protección contra humedad. Procesos de degradación como delaminación, amarillamiento o formación de burbujas afectan la transmisión óptica y el desempeño eléctrico [19].
- **Celdas fotovoltaicas:** encapsuladas entre capas de EVA para evitar daños mecánicos y eléctricos.
- **Backsheet:** capa posterior compuesta generalmente por estructuras multicapa (por ejemplo, Tedlar/PET/Tedlar). Su función es garantizar aislamiento eléctrico y barrera contra la humedad. Fallas como perforaciones o delaminación del backsheet pueden exponer materiales internos, representar riesgos eléctricos y clasificar el módulo como residuo peligroso según normativas RAEE [20].

- **Marco de aluminio:** aporta rigidez estructural y facilita el montaje. Su deformación o corrosión compromete la integridad mecánica del módulo.
- **Caja de conexión y diodos bypass:** permite la conexión externa del módulo y protege las celdas frente a corrientes inversas causadas por sombreado parcial.

Esta configuración implica que las celdas solares quedan completamente encapsuladas durante el proceso de laminación, sin acceso directo individual una vez el módulo ha sido fabricado. En consecuencia, cualquier daño interno en la estructura cristalina del silicio afecta directamente el desempeño eléctrico del módulo y no puede ser corregido mediante intervenciones físicas convencionales. El detalle de la estructura se puede ver en la figura 5.2

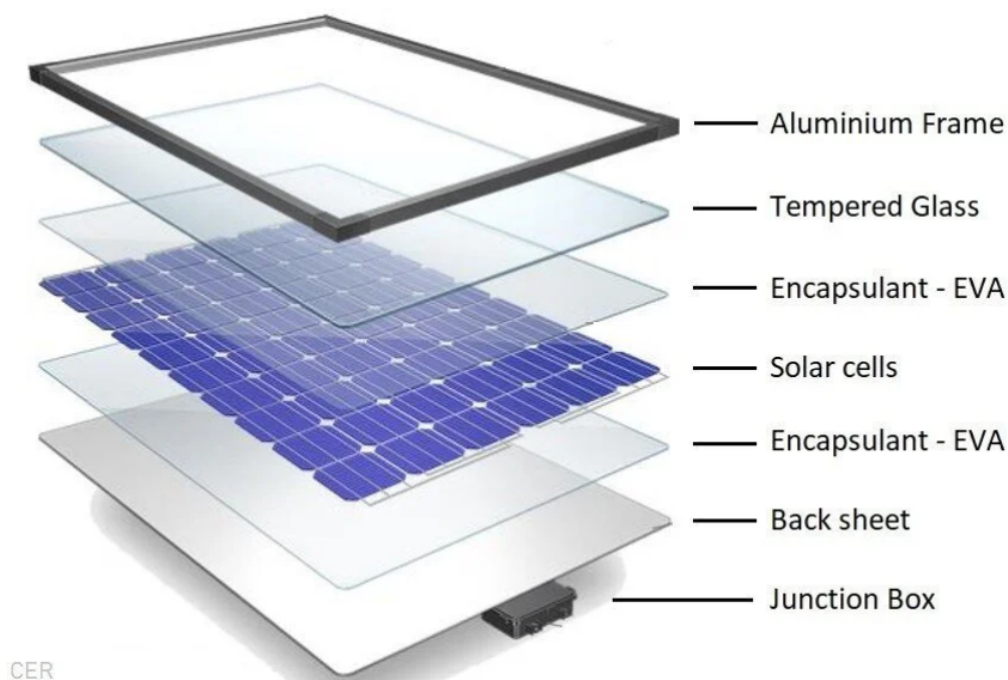


Figura 5.2: Estructura física típica de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino.

Fuente: Adaptado de Clean Energy Reviews [21].

5.2.1.5 Importancia de la evaluación técnica del módulo

La degradación de cualquiera de los componentes estructurales, eléctricos o materiales del módulo puede afectar su rendimiento, seguridad y viabilidad de reutilización. Por esta razón, resulta fundamental realizar evaluaciones técnicas integrales que permitan clasificar los módulos al final de su vida útil en categorías como reutilización, reparación, reciclaje o disposición final, lo cual justifica el desarrollo del protocolo de evaluación propuesto en este trabajo.

5.2.2 Técnicas de diagnóstico aplicadas a módulos fotovoltaicos

Las técnicas de diagnóstico aplicadas a módulos fotovoltaicos constituyen herramientas fundamentales para la evaluación del estado físico y eléctrico de los paneles solares a lo largo de su vida útil y, especialmente, al final de esta. Estas técnicas permiten identificar fallas visibles y no visibles, cuantificar niveles de degradación y establecer criterios técnicos objetivos para la toma de decisiones relacionadas con la operación, reparación o disposición final de los módulos.

En el contexto de la gestión de residuos fotovoltaicos, el uso de métodos de diagnóstico no destructivos resulta particularmente relevante, ya que posibilita una evaluación precisa sin comprometer la integridad del módulo. Entre las técnicas más empleadas se encuentran la termografía infrarroja y la electroluminiscencia, las cuales permiten detectar anomalías térmicas y defectos internos en las celdas fotovoltaicas, respectivamente. Estas herramientas se integran en la metodología propuesta como etapas clave del proceso de clasificación técnica de los paneles solares.

5.2.2.1 Termografía infrarroja aplicada a módulos fotovoltaicos

La termografía infrarroja es una técnica de diagnóstico no destructivo ampliamente utilizada para la evaluación del estado operativo de módulos fotovoltaicos. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de la radiación infrarroja emitida por las superficies, la cual está directamente relacionada con la temperatura del material. En el contexto de los paneles solares, esta técnica permite identificar anomalías térmicas asociadas a fallas eléctricas o estructurales internas que no son visibles mediante inspección visual.

Durante la operación normal de un módulo fotovoltaico, la distribución térmica sobre su superficie debe ser relativamente homogénea. La presencia de zonas con temperaturas significativamente superiores al promedio, conocidas como *hot-spots*, indica pérdidas localizadas de potencia relacionadas con defectos como celdas dañadas, microfisuras, sombreado parcial, degradación del encapsulante EVA o fallas en los diodos bypass. Estos puntos calientes generan estrés térmico adicional, aceleran los procesos de degradación y pueden comprometer tanto el rendimiento eléctrico como la seguridad del módulo.

La termografía infrarroja se realiza generalmente bajo condiciones adecuadas de irradiancia y carga eléctrica, y los criterios de evaluación se basan en la diferencia de temperatura entre celdas adyacentes o respecto al promedio del módulo. En la metodología desarrollada en este trabajo, esta técnica se emplea como una etapa intermedia de diagnóstico, permitiendo identificar módulos potencialmente reparables o descartar aquellos con fallas térmicas severas que afectan su integridad estructural y funcional.

Condiciones ambientales y limitaciones de la técnica. La fiabilidad de la termografía infrarroja depende de un conjunto de condiciones ambientales y de configuración del equipo que deben controlarse para evitar falsos positivos o negativos en la detección de *hot-spots*:

- **Irradiancia mínima:** se recomienda una irradiancia superior a 500 W/m^2 durante la captura, de modo que el módulo opere bajo una carga eléctrica suficiente para que las diferencias térmicas asociadas a fallas sean detectables; con irradiancias bajas, el contraste térmico entre celdas sanas y defectuosas se reduce significativamente.

- **Emisividad:** la emisividad de la superficie del módulo (típicamente 0.85–0.90 para el vidrio frontal) debe configurarse en la cámara antes de la captura; una emisividad mal calibrada introduce errores sistemáticos en la temperatura absoluta reportada, aunque afecta en menor medida a la comparación relativa entre celdas.
- **Viento:** velocidades de viento elevadas incrementan la disipación convectiva de calor en la superficie del módulo, atenuando el contraste térmico de los *hot-spots* y pudiendo enmascarar fallas reales; se recomienda evitar mediciones con vientos superiores a 5 m/s.
- **Humedad y superficie mojada:** la presencia de agua sobre el módulo (rocío, lluvia reciente) altera la emisividad efectiva de la superficie y genera patrones térmicos no asociados a fallas eléctricas; el ensayo debe posponerse hasta que la superficie esté completamente seca.
- **Ángulo y distancia de captura:** se recomienda un ángulo de observación inferior a 30° respecto a la normal del módulo para minimizar efectos de reflexión, y una distancia que garantice una resolución mínima de varios píxeles por celda para poder atribuir el defecto a una celda específica.
- **Resolución térmica de la cámara:** se recomienda una sensibilidad térmica (NETD) igual o mejor a 0.1 °C, necesaria para distinguir diferenciales moderados que podrían indicar fallas incipientes antes de que se vuelvan críticas.

Cuando estas condiciones no pueden garantizarse en campo, el protocolo recomienda posponer la termografía o interpretar sus resultados como preliminares, sujetos a confirmación mediante electroluminiscencia y la medición de la curva I–V.

5.2.2.2 Electroluminiscencia como técnica de diagnóstico interno

La electroluminiscencia (EL) es una técnica avanzada de caracterización empleada para evaluar la integridad interna de las celdas fotovoltaicas. Su funcionamiento se basa en el principio físico según el cual una celda solar, al ser **polarizada eléctricamente en directa** (es decir, forzada eléctricamente con una fuente externa en el mismo sentido que su operación normal, pero sin iluminación), emite radiación electromagnética en el rango del infrarrojo cercano por recombinación de portadores. Esta emisión es captada mediante cámaras especializadas, generando imágenes que permiten visualizar defectos internos del módulo.

Método y estándar adoptado. El protocolo adopta el método de electroluminiscencia por polarización directa en corriente continua (*DC forward-bias EL imaging*), normalizado en la especificación técnica **IEC TS 60904-13:2018 – Photovoltaic devices – Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules** [22]. Esta norma define tres elementos que el protocolo incorpora explícitamente: (a) el procedimiento de captura de las imágenes de electroluminiscencia, (b) el procesamiento de dichas imágenes para obtener métricas cuantitativas, y (c) los criterios de interpretación cualitativa de los defectos observados.

De acuerdo con IEC TS 60904-13, el módulo se polariza en directa mediante una fuente de alimentación DC —no mediante exposición solar— de modo que las celdas emiten radiación en el

infrarrojo cercano (aproximadamente 1 000–1 150 nm) proporcional a la recombinación de portadores en las zonas eléctricamente activas. La norma contempla dos regímenes de corriente según el objetivo del ensayo:

- **Corriente cercana a I_{sc} ($1 \times I_{sc}$):** utilizada para el barrido diagnóstico general; permite observar el patrón de emisión completo del módulo e identificar rápidamente celdas inactivas, líneas de interconexión defectuosas y patrones asociados a PID.
- **Corriente reducida ($\approx 0.1 \times I_{sc}$):** recomendada por el Anexo C de la norma para resaltar el contraste de microfisuras (*microcracks*) finas, ya que a baja corriente las fracturas parcialmente conductoras se visualizan con mayor nitidez que a corriente nominal.

Equipo y condiciones de captura. La Tabla 5.1 resume los parámetros técnicos del ensayo adoptados en el protocolo.

Cuadro 5.1: Parámetros técnicos del ensayo de electroluminiscencia

Elemento	Especificación adoptada
Fuente de polarización	Fuente DC / equipo EL dedicado, con control de corriente regulable entre $0.1 \times I_{sc}$ y $1 \times I_{sc}$ del módulo bajo prueba
Sensor de captura	Cámara CCD enfriada o InGaAs sensible al infrarrojo cercano (≈ 900 – $1\,200$ nm)
Condición lumínica	Oscuridad total (sala oscura o carpa opaca), para eliminar contaminación por luz ambiental
Tiempo de exposición	De varios segundos a decenas de segundos, según sensibilidad del sensor y corriente aplicada
Referencia normativa	IEC TS 60904-13:2018, captura (Cl. 6), procesamiento (Cl. 7) e interpretación (Cl. 8 y Anexo D) [22]

Momentos de aplicación dentro del protocolo. El ensayo EL se ejecuta en tres momentos del Proceso 2 (Figura 6.5): (1) como **diagnóstico inicial** a $1 \times I_{sc}$, tras superar la termografía IR, para identificar microfisuras o células inactivas antes de decidir si el módulo requiere intervención; (2) como **verificación post-reparación**, repitiendo el ensayo preferiblemente a $0.1 \times I_{sc}$ para confirmar que la fractura o celda inactiva no se propagó y que la intervención fue efectiva; y (3) como **soporte a la matriz multicriterio**, donde la severidad y localización de los defectos observados alimentan directamente el puntaje del criterio “condición de reparabilidad” (peso 0.15 en el Cuadro 6.2).

Las imágenes obtenidas por electroluminiscencia permiten identificar con alta precisión la presencia de microfisuras, fracturas en las celdas, zonas eléctricamente inactivas, fallas en las interconexiones metálicas y fenómenos de degradación inducida por potencial (PID), siguiendo los criterios cualitativos de interpretación de la Tabla 5.2. A diferencia de la inspección visual o la termogra-

fía, esta técnica permite detectar defectos internos en etapas tempranas, incluso antes de que se manifiesten como pérdidas térmicas o eléctricas significativas.

Cuadro 5.2: Criterios de interpretación de la imagen de electroluminiscencia

Patrón observado	Interpretación técnica
Zonas de emisión uniforme y brillante	Celda eléctricamente sana
Zonas oscuras completas	Célula inactiva o desconectada
Líneas oscuras finas y ramificadas	Microfisuras (<i>microcracks</i>)
Oscurecimiento progresivo hacia los bordes de las celdas	Degradación inducida por potencial (PID)
Patrones oscuros irregulares aislados	Soldaduras defectuosas o puntos de contacto degradados

En el marco de la metodología propuesta, la electroluminiscencia se utiliza como una herramienta complementaria de diagnóstico eléctrico, especialmente útil para diferenciar entre módulos reparables y aquellos cuya degradación interna compromete de manera irreversible su desempeño. La información obtenida mediante esta técnica contribuye directamente a la clasificación técnica del panel y a la toma de decisiones sobre su reutilización, reparación o disposición final.

5.2.2.3 Síntesis comparativa de las técnicas de diagnóstico

Ninguna de las técnicas descritas en esta sección es suficiente por sí sola para sustentar la clasificación de un módulo fotovoltaico: cada una detecta un subconjunto de fallas y presenta limitaciones específicas de condiciones de uso, razón por la cual el protocolo las combina de forma secuencial (inspección visual → termografía → electroluminiscencia → curva I–V) en lugar de emplear una sola de ellas. El Cuadro 5.3 sintetiza el alcance y las limitaciones de cada técnica.

Cuadro 5.3: Comparación de las técnicas de diagnóstico empleadas en el protocolo

Técnica	Defectos que detecta	Lo que no detecta	Condiciones de uso	Limitaciones
Inspección visual	Fracturas de vidrio, corrosión, delaminación visible, daño de marco/caja de conexión	Defectos internos de celda, microfisuras no propagadas, degradación eléctrica sin daño visible	Cualquier momento; luz natural o artificial lateral y frontal	Depende de la experiencia del evaluador; no cuantifica severidad eléctrica
Termografía IR	<i>Hot-spots</i> , diodos bypass dañados, conexiones defectuosas, sombreado parcial	Microfisuras sin disipación térmica significativa, degradación uniforme de baja magnitud	Irradiancia $>500 \text{ W/m}^2$, viento $<5 \text{ m/s}$, superficie seca, ángulo $<30^\circ$	Sensible a emisividad, viento y humedad; requiere carga eléctrica activa
Electroluminiscencia (EL)	Microfisuras, células inactivas, fallas de interconexión, PID	Fallas puramente térmicas sin correlato eléctrico interno (p.ej. suciedad superficial)	Oscuridad total; polarización DC en directa ($0.1-1 \times I_{sc}$)	Requiere desconexión del módulo y equipo especializado (cámara NIR)
Curva I-V	Pérdida de P_{max} , desviaciones de V_{oc}/I_{sc} , factor de forma degradado	Localización espacial del defecto dentro del módulo	Condiciones estables de irradiancia; corrección por temperatura	No identifica por sí sola la causa física de la pérdida de potencia

Esta complementariedad explica la secuencia adoptada en el Proceso 2 del protocolo (Figura 6.5): la termografía y la electroluminiscencia actúan como filtros de localización y diagnóstico de causa, mientras que la curva I-V aporta la cuantificación final del desempeño que alimenta la matriz multicriterio.

5.2.3 Economía circular y ciclo de vida (LCA)

El modelo de economía circular plantea mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible mediante estrategias como la reparación, la reutilización y el reciclaje [23]. En el caso de los paneles solares, este enfoque promueve la extensión de su vida útil o la recuperación de componentes valiosos como silicio, vidrio y metales, reduciendo la generación de residuos.

Complementariamente, el análisis de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) permite evaluar los impactos ambientales asociados a un producto desde la etapa de fabricación hasta su disposición final [24]. Aunque el presente trabajo no desarrolla un LCA completo, este enfoque sirve como marco conceptual para identificar puntos críticos en los que intervenciones como la reparación o el reciclaje contribuyen a la reducción de impactos ambientales.

5.2.4 Directiva WEEE (Unión Europea)

La Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE) constituye la referencia normativa más consolidada a nivel internacional para la gestión de RAEE. Esta directiva incluye explícitamente a los módulos fotovoltaicos, obligando a los fabricantes a organizar y financiar su recolección, tratamiento y reciclaje.

La WEEE establece objetivos mínimos de valorización y reciclaje, que para los paneles solares alcanzan valores de hasta el 85 % en recuperación y el 80 % en reciclaje, además de exigir trazabilidad y control en la gestión de los residuos [25].

5.2.5 Programas internacionales (IEA-PVPS, IRENA)

El programa Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS) de la Agencia Internacional de Energía ha generado guías técnicas para la gestión de residuos fotovoltaicos, destacando la necesidad de protocolos de clasificación previa al reciclaje. Asimismo, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) publicó en 2016 el informe End-of-Life Management of Solar PV Panels, que proyecta más de 78 millones de toneladas de residuos fotovoltaicos para 2050 y propone esquemas de economía circular aplicables a escala global [24].

5.2.6 Normativa y contexto latinoamericano

En América Latina aún no existe un protocolo estandarizado específico para la gestión de paneles solares al final de su vida útil. No obstante, algunos países han avanzado en marcos regulatorios generales para residuos eléctricos y electrónicos:

1. Chile: Ley 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP).
2. Brasil: Política Nacional de Residuos Sólidos (2010).
3. Colombia: Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente.
4. Colombia: Decreto 4741 de 2005 sobre manejo de residuos peligrosos.
5. Colombia: Ley 1672 de 2013 sobre gestión integral de RAEE.
6. Colombia: Resolución 2184 de 2019 sobre separación de residuos en la fuente.
7. Colombia: Resolución 851 de 2022, que establece lineamientos para RAEE, sin una categoría específica para paneles solares.

Este vacío normativo evidencia la necesidad de desarrollar protocolos técnicos específicos para residuos fotovoltaicos en la región [3].

5.2.7 Vacíos y desafíos normativos

A pesar de los avances en la Unión Europea y de las guías internacionales disponibles, persisten vacíos significativos en la gestión de residuos fotovoltaicos, especialmente en contextos latinoamericanos:

1. Falta de armonización normativa entre países.
2. Escasa infraestructura especializada para el reciclaje de paneles solares.
3. Altos costos asociados a la logística inversa y al procesamiento.
4. Ausencia de protocolos técnicos de diagnóstico y clasificación que determinen si un panel debe reutilizarse, repararse o reciclarse.

En este contexto, resulta necesario el desarrollo de herramientas técnicas que permitan una gestión diferenciada y responsable de los residuos fotovoltaicos, como el protocolo propuesto en el presente trabajo.

5.3 Trabajos Relacionados

5.3.1 Proyecto colombiano sobre gestión de RAEE en paneles fotovoltaicos

Silva García, Lilian Maritza (2024) desarrolló el proyecto *“Desarrollo de un protocolo para la adecuada gestión de RAEE procedentes de paneles fotovoltaicos en Colombia”*. Este trabajo constituye un aporte directo a la problemática nacional, al proponer lineamientos técnicos y normativos orientados a la separación y disposición de módulos solares al final de su vida útil. El estudio aborda, entre otros aspectos:

1. Identificación de materiales críticos presentes en los módulos fotovoltaicos, tales como silicio, vidrio, aluminio, cobre, plata y plomo.
2. Evaluación de técnicas de reciclaje mecánicas, térmicas y químicas, considerando su viabilidad en el contexto colombiano.
3. Recomendaciones para la implementación de plantas piloto de reciclaje fotovoltaico.

Este antecedente evidencia que en Colombia ya se están gestando iniciativas para enfrentar la problemática de los residuos solares; sin embargo, no se establece un protocolo estandarizado que integre diagnóstico técnico, clasificación funcional y criterios ambientales de forma sistemática [26].

5.3.2 Planta de tratamiento de paneles fotovoltaicos en Puertollano (España)

La empresa Aurinka E-Circular, vinculada al grupo Ferroglobe, se encuentra en proceso de construcción de una planta de tratamiento de paneles fotovoltaicos en Puertollano, Castilla-La Mancha, con una capacidad máxima de hasta 6 800 toneladas anuales. Su operación promedio estimada es de 3 000 toneladas por año, considerando labores de mantenimiento y pruebas.

El modelo de la planta se basa en la separación de los módulos entre aquellos potencialmente reutilizables, que son sometidos a pruebas técnicas para su reintegración al mercado, y aquellos destinados al reciclaje, de los cuales se recuperan materiales como cobre, aluminio, vidrio, marcos y encapsulantes EVA. Este enfoque demuestra la viabilidad técnica y económica de la clasificación previa al reciclaje como estrategia para maximizar el aprovechamiento de los módulos fotovoltaicos [11].

5.3.3 Proyecto PHOTORAMA (Horizonte 2020) — Economía circular para residuos fotovoltaicos

El proyecto europeo PHOTORAMA, financiado por el programa Horizonte 2020, ha sido reconocido por su innovación en el reciclaje de paneles solares y la recuperación de materias primas estratégicas como vidrio, aluminio, cobre, plata, silicio e indio. El proyecto ha desarrollado unidades piloto para el desmontaje mecánico, así como procesos de recuperación mediante lixiviación y electrodeposición, incorporando prácticas sostenibles como la reutilización de reactivos y la reducción de residuos secundarios. La finalización del proyecto está prevista para el año 2025 [27].

5.3.4 Cierre del marco de referencias

Los trabajos analizados permiten evidenciar avances significativos en la gestión de residuos fotovoltaicos a nivel nacional e internacional. No obstante, la mayoría de las iniciativas se centran en procesos de reciclaje o en lineamientos generales de gestión, sin integrar de manera sistemática criterios de diagnóstico físico, eléctrico y ambiental que permitan decidir, de forma objetiva, la reutilización, reparación o disposición final de los módulos.

Los conceptos desarrollados en este marco teórico, relacionados con el funcionamiento eléctrico y estructural de los módulos fotovoltaicos, los mecanismos de degradación y los enfoques de economía circular y gestión de RAEE, constituyen la base técnica sobre la cual se construye la metodología propuesta en el presente trabajo.

Materiales y Métodos

A partir de los fundamentos técnicos y conceptuales expuestos en el marco teórico, se desarrolló una metodología orientada a la evaluación sistemática de módulos fotovoltaicos al término de su vida útil. Esta metodología traduce los principios físicos, eléctricos y ambientales en criterios técnicos de decisión aplicables en campo, mediante la inspección física, el diagnóstico eléctrico y la evaluación ambiental del panel.

La metodología se materializa en un conjunto de diagramas de flujo que permiten clasificar los módulos fotovoltaicos como operativos, reparables o irrecuperables, considerando parámetros técnicos medibles, condiciones estructurales observables y la presencia de materiales potencialmente peligrosos. Este enfoque garantiza un proceso reproducible, objetivo y alineado con las buenas prácticas de gestión de residuos fotovoltaicos y con los principios de la economía circular.

En este sentido, el enfoque metodológico integra de manera simultánea los siguientes componentes:

- Revisión técnico-científica de la degradación, fallas y reciclaje de módulos fotovoltaicos [1, 2, 6].
- Análisis normativo nacional e internacional aplicable a la gestión de residuos RAEE y paneles solares [4, 5, 10].
- Análisis comparado de tecnologías fotovoltaicas, incluyendo silicio cristalino y tecnologías de capa delgada [4, 26].
- Construcción de matrices multicriterio para la ponderación de variables técnicas, eléctricas y ambientales [3, 23].
- Modelación del proceso de evaluación mediante diagramas de flujo jerárquicos.
- Diseño de instrumentos técnicos de inspección y diagnóstico aplicables en condiciones reales de operación.

La necesidad de este protocolo se sustenta en el crecimiento acelerado de los residuos fotovoltaicos (PV-Waste), que ya crecen cinco veces más rápido que la capacidad de reciclaje global [9]. En Colombia y Latinoamérica persiste la ausencia de lineamientos técnicos específicos para evaluar y clasificar paneles solares retirados [3], lo cual limita la toma de decisiones en empresas, autoridades ambientales y operadores RAEE. Por ello, este proyecto adopta un enfoque metodológico proyectivo-tecnológico orientado a producir un instrumento aplicable y validable.

6.1 Tipo de estudio

Este trabajo se clasifica como un estudio **proyectivo–tecnológico**, cuyo objetivo es formular un protocolo técnico como producto final. Dicho protocolo se construye a partir de evidencia documental, normativa y técnica, permitiendo:

- Establecer criterios verificables para la evaluación de paneles solares.
- Integrar estándares internacionales como IEC 61215 y 61730.
- Apoyar decisiones sobre reutilización, reparación, reciclaje o descarte.
- Promover la gestión ambientalmente adecuada de RAEE fotovoltaicos.

Este tipo de estudio es recomendado para proyectos donde el resultado es una herramienta operativa basada en mejores prácticas técnicas [4, 10, 26].

6.2 Estructura metodológica general

La metodología completa se organizó en seis actividades (1–6):

1. Identificación del problema y revisión sistemática de literatura.
2. Construcción de criterios técnicos de clasificación.
3. Análisis de tecnologías fotovoltaicas y su composición material.
4. Revisión normativa y análisis comparado.
5. Diseño del protocolo técnico (matriz + flujo + formato).
6. Técnicas de análisis y validación.

Cada actividad se describe con detalle a continuación.

6.3 1. Identificación del problema y revisión técnico–científica

Se aplicó una revisión sistemática basada en PRISMA, consultando bases como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e informes de IRENA e IEA-PVPS [4, 5, 9]. Las ecuaciones de búsqueda incluyeron:

```
"PV end-of-life", "photovoltaic waste",  
"PV module recycling", "hot-spot", "microcracks",  
"PV degradation mechanisms"
```

1.1 Identificación de mecanismos de fallo

A partir de la revisión de literatura técnica y científica [2, 6, 5, 26], se identificaron los mecanismos de fallo más frecuentes que afectan el desempeño, la seguridad y la vida útil de los módulos fotovoltaicos. Estos mecanismos constituyen la base para la inspección física y el diagnóstico eléctrico posterior del protocolo propuesto.

- **Microfisuras (microcracks):** Corresponden a fracturas microscópicas en las celdas fotovoltaicas, generalmente originadas durante el transporte, instalación o por cargas mecánicas y térmicas repetitivas. Estas fisuras pueden interrumpir caminos de conducción eléctrica, reducir la potencia de salida y acelerar la degradación del módulo.

Las microfisuras (*microcracks*) no son técnicamente reparables, ya que corresponden a fracturas internas en la estructura cristalina del silicio de las celdas solares. Dado que estas celdas se encuentran encapsuladas entre capas de EVA y selladas dentro de una estructura laminada, no es posible acceder ni reconstruir la red cristalina sin destruir el módulo completo.

No obstante, en casos de microfisuras leves, es posible mitigar parcialmente sus efectos eléctricos mediante procesos de reacondicionamiento, tales como la reconfiguración de strings o la reasignación del módulo a aplicaciones de menor exigencia energética. Estas acciones no constituyen una reparación estructural, sino una estrategia de gestión funcional del módulo para extender su vida útil. La Figura 6.1 ilustra un ejemplo típico de microfisuras observadas mediante electroluminiscencia.

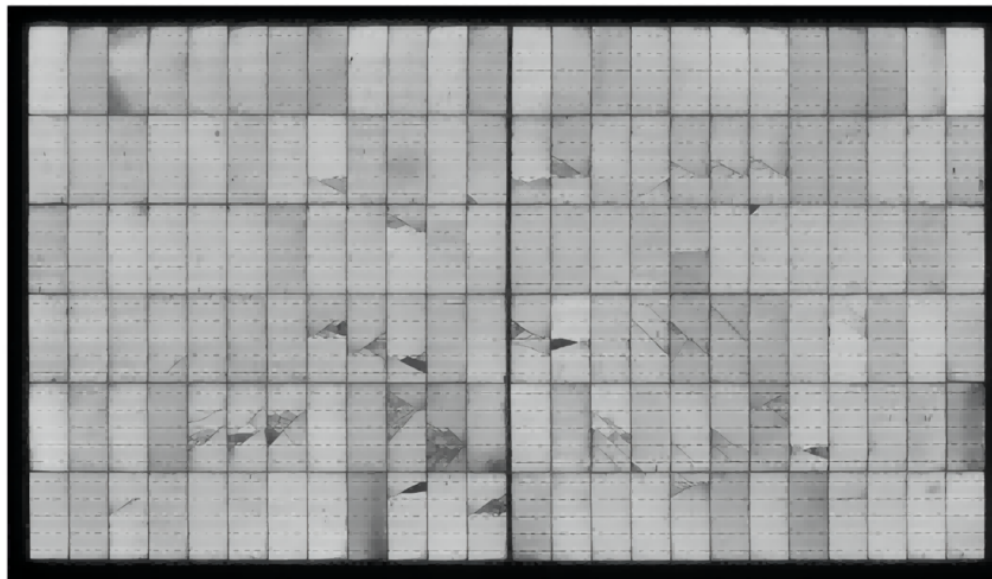


Figura 6.1: Ejemplo de microfisuras (*microcracks*) en celdas fotovoltaicas, evidenciadas como fracturas internas que afectan el desempeño eléctrico del módulo.

Fuente: adaptado de Maysun Solar (2024), *Microcracks on Solar Panels – Inspection and Prevention Guide* [28].

- **PID (Potential Induced Degradation):** Es un fenómeno de degradación inducido por diferencias de potencial entre las celdas y el marco del módulo, que provoca migración iónica y pérdidas significativas de potencia. El PID se manifiesta comúnmente como una reducción progresiva de la tensión y de la potencia máxima, especialmente en sistemas operando a altos voltajes.
- **Delaminación del encapsulante EVA:** Consiste en la pérdida de adhesión entre el EVA y las capas del módulo (vidrio o backsheet), lo cual permite el ingreso de humedad y contaminantes. Este mecanismo compromete la integridad estructural y acelera la corrosión de interconexiones internas.
- **Puntos calientes (hot-spots):** Se presentan cuando una celda o un grupo de celdas opera en condición de disipación de potencia, generando un aumento localizado de temperatura. Los hot-spots pueden causar daños permanentes en el módulo y representan un riesgo de seguridad. La Figura 6.2 muestra un ejemplo de puntos calientes detectados mediante termografía infrarroja en un módulo fotovoltaico. Este tipo de falla se asocia generalmente a microfisuras, celdas inactivas, conexiones defectuosas o diodos bypass dañados y puede generar degradación acelerada del módulo, pérdida de potencia y riesgos de sobrecalentamiento. La imagen fue adaptada de SFE Solar [29].

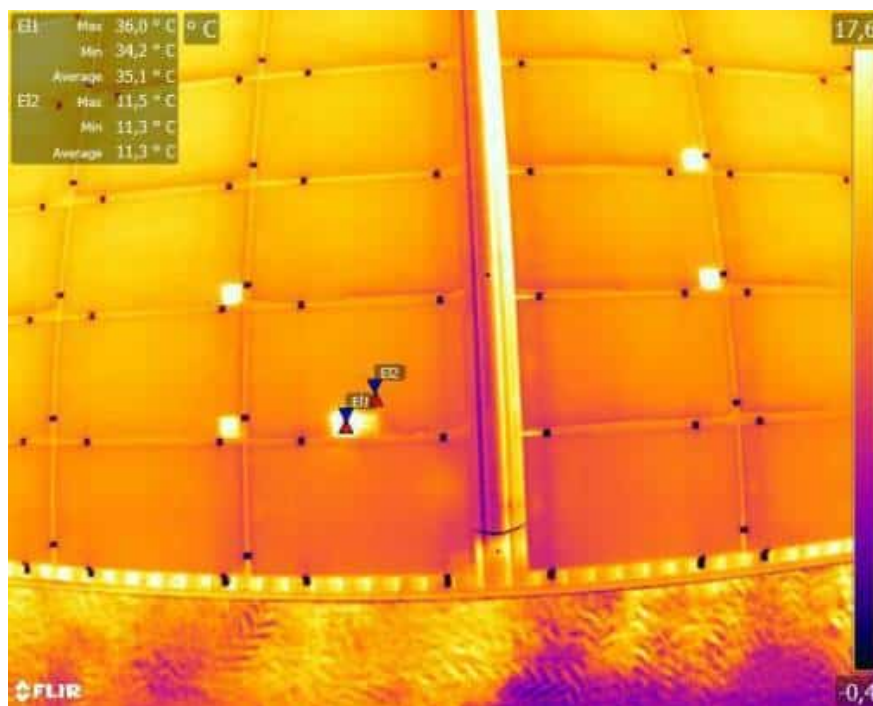


Figura 6.2: Imagen termográfica de puntos calientes (*hot-spots*) en módulos fotovoltaicos, donde se evidencian incrementos localizados de temperatura asociados a fallas eléctricas internas.

- **Corrosión del backsheet:** Se refiere al deterioro del material posterior del módulo, general-

mente asociado a exposición prolongada a humedad, radiación UV y ambientes agresivos. La degradación del backsheet puede derivar en fallas eléctricas, riesgos de aislamiento y exposición de materiales peligrosos.

- **Reducción de $P_{\max}$ con la edad:** Corresponde a la disminución gradual de la potencia máxima entregada por el módulo como consecuencia del envejecimiento natural de sus componentes. Este fenómeno es un indicador clave del estado funcional del panel y se utiliza como parámetro principal en la clasificación técnica.

1.2 Identificación de variables críticas

Con base en los mecanismos de fallo identificados y en estudios previos [6, 3, 4, 5], se definieron las variables críticas que permiten evaluar de forma integral el estado de los módulos fotovoltaicos. Estas variables se agruparon en tres categorías principales:

- **Variables físicas:** Incluyen el estado del vidrio frontal, el marco estructural, el encapsulante EVA, el backsheet, las soldaduras y la caja de conexión. Estas variables permiten identificar daños mecánicos, riesgos de seguridad y condiciones que pueden impedir la reutilización o reparación del módulo.
- **Variables eléctricas:** Comprenden la potencia máxima ($P_{\max}$), la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el factor de forma (FF) y la curva corriente–voltaje (I–V) completa. La Figura 6.3 muestra la curva característica corriente–voltaje (I–V) de una celda fotovoltaica bajo condiciones estándar de prueba. A partir de esta curva se definen los principales parámetros eléctricos del módulo, tales como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (V_m , I_m) y el factor de forma (FF), el cual constituye un indicador de la calidad eléctrica de la celda.

La curva de potencia asociada permite identificar el valor máximo de potencia entregada por el dispositivo, parámetro fundamental para evaluar la degradación y el desempeño funcional de los módulos fotovoltaicos durante su diagnóstico eléctrico.

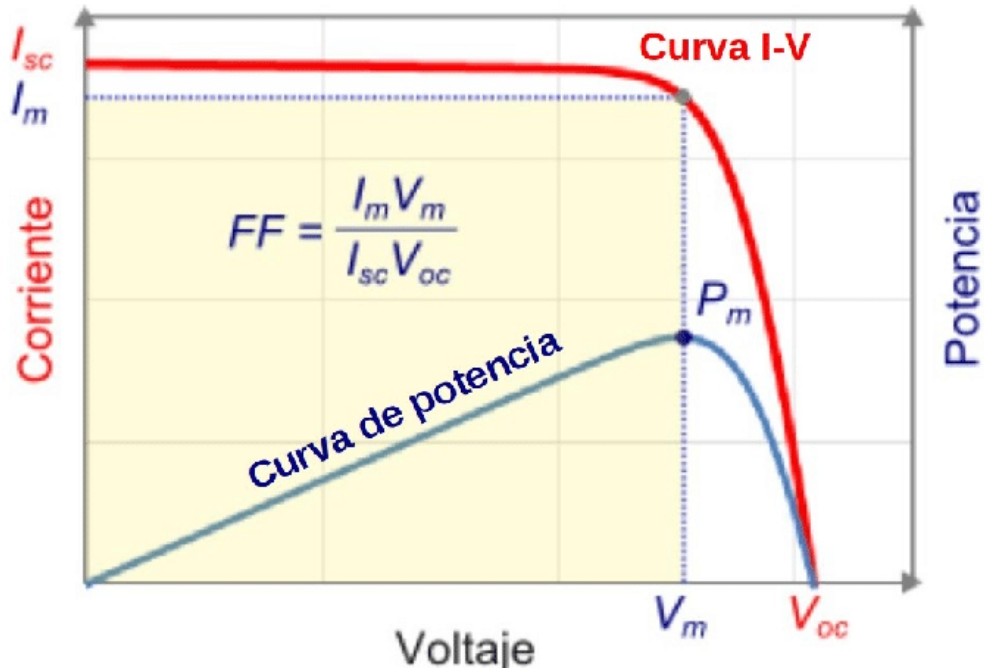


Figura 6.3: Curva característica corriente–voltaje (I–V) y curva de potencia de una celda solar fotovoltaica, donde se identifican la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (P_m) y el factor de forma (FF).

Fuente: adaptado de [30].

El Cuadro 6.1 sintetiza el significado físico de cada variable eléctrica, el tipo de falla que evidencia y su peso relativo dentro de la matriz multicriterio (Cuadro 6.3), de modo que se explicita por qué P_{max} concentra el mayor peso mientras que V_{oc} e I_{sc} cumplen un rol complementario.

Cuadro 6.1: Comparación de las variables eléctricas del protocolo

Variable	Qué representa	Tipo de falla que evidencia	Importancia en el protocolo
P_{max}	Potencia máxima entregada por el módulo en STC; indicador global de desempeño energético.	Degradación acumulada, celdas inactivas, microfisuras extendidas, delaminación.	Criterio principal de clasificación; peso 0.45 en la matriz multicriterio.
V_{oc}	Tensión en circuito abierto; refleja el estado de la unión p–n y la calidad del semiconductor.	Degradación del semiconductor, PID, defectos de interconexión en serie.	Complementario; ajusta el diagnóstico eléctrico sin sobrerrepresentar su influencia (peso 0.15).
I_{sc}	Corriente de cortocircuito; proporcional a la radiación captada y al área activa funcional.	Sombreado parcial, celdas inactivas, suciedad, defectos en interconexión en paralelo.	Complementario; se evalúa junto con V_{oc} (peso conjunto 0.15).
FF	Factor de forma; indicador de la calidad eléctrica global de la celda (resistencias serie/paralelo).	Resistencias de contacto elevadas, soldaduras defectuosas, diodos bypass dañados.	Indicador de soporte para interpretar la curva I–V; no pondera de forma independiente en la matriz.

- **Variables materiales y ambientales:** Consideran la tecnología fotovoltaica del módulo (silicio cristalino, CdTe, CIGS), la presencia de materiales potencialmente peligrosos como cadmio (Cd), plomo (Pb) o selenio (Se) [9], así como las condiciones de exposición ambiental previa (humedad, temperatura, contaminación). Estas variables son determinantes para la clasificación ambiental y la definición de la ruta de disposición final.

En conjunto, estas variables fundamentan los criterios técnicos de clasificación empleados en el protocolo propuesto y permiten una evaluación objetiva, trazable y coherente con el marco normativo y ambiental.

2. Construcción de criterios técnicos de clasificación

Basado en IEC 61215, IEC 61730 y en los estudios de degradación [2, 6, 4], se formularon cuatro categorías:

- Panel operativo.
- Panel reparable.
- Panel irrecuperable.
- Panel RAEE peligroso.

2.1 Criterios eléctricos

Los criterios eléctricos empleados para la evaluación del estado de los módulos fotovoltaicos se fundamentan en estándares técnicos internacionales ampliamente aceptados en la industria fotovoltaica. En particular, la metodología propuesta se basa en las normas IEC 61215 e IEC 61730, las cuales establecen los procedimientos de ensayo, verificación de desempeño y requisitos de seguridad para módulos fotovoltaicos destinados a operación en campo [4, 5].

De acuerdo con estas normas, la potencia máxima (P_{max}) medida en condiciones estándar de prueba constituye el principal indicador del estado eléctrico del módulo. Asimismo, parámetros como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}) permiten identificar desviaciones asociadas a procesos de degradación, fallas internas o defectos en las conexiones eléctricas.

Con base en las recomendaciones técnicas de la IEC y en reportes del programa IEA-PVPS sobre degradación de módulos fotovoltaicos, se adoptan umbrales de desempeño relativo para la clasificación del estado del panel. Estos umbrales permiten diferenciar módulos que conservan una funcionalidad aceptable, aquellos que presentan pérdidas recuperables y aquellos cuyo deterioro impide su reutilización segura, garantizando un criterio objetivo, reproducible y técnicamente sustentado para la toma de decisiones.

2.1.1 Definición de umbrales eléctricos de desempeño

La definición de los umbrales eléctricos utilizados para la clasificación de los módulos fotovoltaicos se basa en criterios técnicos ampliamente reportados en la literatura especializada y en documentos de referencia de organismos internacionales como la International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS) y la International Renewable Energy Agency (IRENA).

Diversos estudios indican que los módulos fotovoltaicos en operación presentan una degradación anual típica entre el 0.5 % y el 1 % de su potencia nominal, dependiendo de la tecnología, las condiciones ambientales y el régimen de operación [4, 26]. En este contexto, se considera que un módulo que conserva al menos el 85 % de su potencia nominal mantiene un desempeño aceptable y puede continuar en operación sin comprometer la seguridad ni la eficiencia del sistema.

Por otro lado, cuando la potencia medida se encuentra entre el 50 % y el 85 % de la potencia nominal, el módulo presenta un nivel de degradación significativo, pero aún potencialmente recuperable mediante acciones de mantenimiento, reparación de conexiones, reemplazo de diodos bypass o corrección de fallas localizadas. Este rango ha sido reportado como característico de módulos con fallas parciales y degradación no catastrófica [2, 4].

Finalmente, módulos con una potencia inferior al 50 % de su valor nominal se consideran irrecuperables desde el punto de vista técnico y económico, dado que presentan degradación severa, daño estructural interno o fallas eléctricas múltiples que impiden su reutilización segura. En estos

casos, la normativa y las buenas prácticas recomiendan su gestión como residuo, priorizando rutas de reciclaje o disposición final controlada [4, 9]. En resumen se tiene:

Cuadro 6.2: Umbrales eléctricos adoptados para la clasificación de módulos fotovoltaicos

Rango de potencia	Interpretación técnica
$P_{\text{medida}} \geq 85\%P_{\text{nom}}$	Módulo con desempeño adecuado y degradación dentro de rangos normales de operación. Clasificación: Operativo.
$50\% \leq P_{\text{medida}} < 85\%$	Módulo con degradación significativa pero potencialmente recuperable mediante mantenimiento o reparación. Clasificación: Reparable.
$P_{\text{medida}} < 50\%$	Módulo con degradación severa o daño crítico que impide su reutilización técnica y económicamente viable. Clasificación: Irrecuperable.

2.1.2 Justificación técnica de los umbrales adoptados

La selección de 85 % y 50 % de la potencia nominal como puntos de corte no es arbitraria: responde a la convergencia de tres referentes técnicos independientes que, evaluados en conjunto, delimitan zonas de comportamiento eléctrico cualitativamente distintas.

1. **Garantías de fabricante y tasas de degradación reportadas.** Los fabricantes de módulos de silicio cristalino garantizan típicamente entre el 80 % y el 87 % de la potencia nominal al año 25 de operación (garantía lineal de potencia). De forma consistente, la revisión más reciente de tasas de degradación de NREL reporta una mediana de degradación de 0.5–0.8 %/año para tecnologías cristalinas en campo [25]. Un módulo que conserva $\geq 85\%$ de su potencia nominal se encuentra, por tanto, dentro de la envolvente de degradación esperada por envejecimiento normal, sin evidencia de una falla anómala; de ahí que se clasifique como *operativo* sin necesidad de intervención.
2. **Literatura sobre fallas parciales recuperables.** Los estudios ya citados en el marco teórico [5, 10] documentan que las pérdidas de potencia entre 15 % y 50 % están asociadas de forma recurrente a defectos localizados y técnicamente intervenibles (diodos bypass, soldaduras, microfisuras aisladas), mientras que pérdidas superiores al 50 % se correlacionan con degradación multicelda, delaminación extensa o daño estructural del encapsulante, condiciones que la literatura describe como no recuperables mediante intervención de campo. El umbral de 50 % marca, en consecuencia, el punto a partir del cual la relación costo–beneficio de una reparación deja de ser técnicamente justificable.
3. **Coherencia con IEC 61215 / IEC 61730.** Aunque estas normas no fijan un porcentaje único de “fin de vida útil”, establecen que un módulo debe mantener su desempeño y seguridad dentro de los márgenes verificados en la calificación de diseño; se adoptó como criterio de coherencia interna que el límite inferior del rango *operativo* (85 %) se alinee con el umbral

de garantía comercial, y que el límite del rango *irrecuperable* (50 %) refleje una pérdida ya reportada como catastrófica en la literatura revisada, evitando así umbrales intermedios sin sustento documental.

En síntesis, el rango 50–85 % no representa un punto medio arbitrario, sino la franja en la que coexisten evidencia de daño (por debajo de la garantía de fábrica) y evidencia de recuperabilidad técnica (por encima del límite de daño catastrófico reportado), lo cual justifica su tratamiento diferenciado como categoría *reparable*.

Los umbrales de desviación de V_{oc} e I_{sc} (5 %, 10 % y 20 %) se definieron de forma análoga, combinando dos referencias: la incertidumbre de medición aceptada por la norma IEC 60904-1 para la caracterización corriente-voltaje de dispositivos fotovoltaicos, y las tolerancias de fabricación que los fabricantes declaran habitualmente en la ficha técnica (comúnmente $\pm 3\%$ a $\pm 5\%$ sobre los valores nominales de placa). Con base en ello, desviaciones $\leq 5\%$ se consideran dentro del margen combinado de incertidumbre de medición y tolerancia de fabricación y no se interpretan como evidencia de falla; desviaciones entre 5 % y 10 % ya exceden la tolerancia de fábrica, pero son compatibles con degradación leve de interconexiones o efectos de temperatura no corregidos del todo; desviaciones entre 10 % y 20 % no son explicables por tolerancia de fabricación ni por incertidumbre de medición y se asocian a defectos eléctricos identificables (celdas inactivas, microfisuras, PID); y desviaciones superiores al 20 % superan ampliamente cualquier margen instrumental o de fabricación, por lo que se interpretan como falla eléctrica severa o generalizada.

Comparación de los umbrales propuestos con la literatura. No existe un consenso absoluto entre organismos internacionales respecto al valor de potencia que marca el fin de la vida útil funcional de un módulo fotovoltaico, lo cual hace necesario situar el umbral adoptado en este trabajo frente a los criterios reportados en la literatura. La práctica comercial más extendida –reflejada en las garantías lineales de potencia de los fabricantes– considera que un módulo alcanza el fin de su vida útil *comercial* cuando su potencia desciende a aproximadamente el 80 % de la nominal [25]. Sin embargo, los informes de IEA-PVPS e IRENA [24] documentan que un número significativo de módulos con desempeños inferiores a ese valor continúan siendo técnicamente aptos para aplicaciones de menor exigencia energética, microrredes aisladas o proyectos de segunda vida (*second-life*), lo que evidencia que el umbral de garantía comercial no equivale a un umbral de *inutilidad técnica*.

El Cuadro 6.3 contrasta el umbral adoptado en el protocolo con los criterios de otras fuentes de referencia. Frente al 80 % típico de garantía comercial, el presente trabajo adopta deliberadamente un umbral más conservador (85 %) para la categoría *operativo*, priorizando que la reutilización sin intervención se reserve para módulos con un margen de desempeño verificablemente sano; al mismo tiempo, incorpora el rango 50–85 % como categoría *reparable*, en lugar de descartar directamente los módulos bajo el umbral comercial, recogiendo así la evidencia de IEA-PVPS/IRENA sobre el potencial de segunda vida de módulos con pérdidas de potencia moderadas.

Cuadro 6.3: Comparación del umbral adoptado con criterios reportados en la literatura

Fuente / criterio	Umbral de referencia	Enfoque
Garantía lineal de fabricante [25]	$\approx 80\%$ P_{nom} a 25 años	Fin de vida útil <i>comercial</i> ; no implica inutilidad técnica.
IEA-PVPS / IRENA [24]	Sin umbral único; énfasis en potencial de segunda vida	Módulos bajo el umbral comercial pueden reutilizarse en aplicaciones de menor exigencia (microrredes, <i>second-life</i>).
IEC 61215 / IEC 61730	Sin porcentaje explícito	Establece márgenes de desempeño y seguridad verificados en calificación de diseño, usados como referencia de coherencia.
Protocolo propuesto (este trabajo)	85 % operativo / 50 % irrecuperable	Umbral conservador para reutilización directa, con categoría intermedia <i>reparable</i> que evita el descarte prematuro de módulos con potencial de segunda vida.

2.2 Criterios físicos

Los criterios físicos permiten evaluar la integridad estructural del módulo fotovoltaico y determinar si este puede continuar en operación, ser objeto de reparación o debe ser retirado definitivamente del sistema. Estos criterios se fundamentan en estudios sobre mecanismos de falla estructural y envejecimiento de módulos fotovoltaicos, así como en las recomendaciones técnicas de IRENA y la IEA-PVPS [6, 4, 5].

Se consideran como indicadores de deterioro físico crítico los siguientes aspectos:

- **Fracturas del vidrio frontal:** comprometen la protección de las celdas y permiten el ingreso de humedad, incrementando el riesgo de cortocircuitos, corrosión interna y fallas eléctricas.
- **Separación o deformación del marco:** afecta la estabilidad mecánica del módulo, incrementa el riesgo de desprendimiento durante la operación y dificulta su reinstalación segura.
- **Delaminación del encapsulante:** indica degradación del EVA, lo cual reduce la adherencia entre capas, favorece la entrada de agentes ambientales y acelera la degradación eléctrica del módulo.
- **Corrosión avanzada:** observable en conectores, soldaduras o el backsheet, generalmente asociada a ambientes húmedos o salinos, y que impacta negativamente la confiabilidad eléctrica.
- **Daño severo en cables o caja de conexión:** representa un riesgo directo de falla eléctrica, calentamiento localizado y potenciales incidentes de seguridad.

La presencia de uno o más de estos daños físicos, cuando no son localizados ni reparables, conduce a la clasificación del módulo como irrecuperable desde el punto de vista técnico.

Justificación del tratamiento binario de los criterios físicos. A diferencia de los criterios eléctricos, que admiten grados intermedios y se ponderan dentro de la matriz multicriterio, los criterios físicos descalificantes (fractura de vidrio, deformación de marco, delaminación severa, corrosión avanzada, daño en la caja de conexión) se tratan como condiciones binarias (presente/ausente) y no como una escala graduada. Esta decisión metodológica se sustenta en que dichos daños corresponden a los modos de falla que la norma IEC 61730 identifica como riesgos directos a la seguridad eléctrica y mecánica (pérdida de aislamiento, exposición de conductores, riesgo de choque eléctrico o incendio); la propia norma no pondera estos riesgos, sino que los trata como condiciones de aprobación o rechazo. En consecuencia, un único punto de falla de aislamiento invalida la posibilidad de reutilización segura del módulo, independientemente de su desempeño eléctrico, por lo que ningún puntaje favorable en otro criterio de la matriz puede compensarlo.

2.3 Criterios ambientales

Los criterios ambientales están orientados a identificar riesgos asociados a la composición material del módulo fotovoltaico y a su potencial impacto sobre el medio ambiente y la salud humana al final de su vida útil. Estos criterios se alinean con los principios de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y con la normativa internacional y nacional vigente [3, 10, 9].

En particular, los módulos que contienen materiales considerados peligrosos, tales como cadmio (Cd) en tecnologías CdTe, plomo (Pb) presente en soldaduras y selenio (Se) en tecnologías CIGS, requieren un manejo diferenciado debido a su toxicidad y persistencia ambiental.

Por esta razón, si durante la identificación tecnológica o la inspección del módulo se detecta la presencia de estos materiales, el panel se clasifica automáticamente como RAEE peligroso, independientemente de su estado físico o eléctrico. Esta decisión busca garantizar una gestión segura, priorizando rutas de reciclaje especializado o disposición final controlada, en concordancia con la Directiva WEEE [10] y los lineamientos internacionales de IRENA [4].

3. Análisis de tecnologías fotovoltaicas

El análisis de las tecnologías fotovoltaicas constituye un componente fundamental para el diseño del protocolo técnico propuesto, dado que la composición material, el comportamiento eléctrico y los mecanismos de degradación varían significativamente entre tecnologías. Estas diferencias inciden directamente en los criterios de evaluación, las posibilidades de reutilización o reparación y las rutas de disposición final de los módulos al final de su vida útil.

En este estudio se analizaron las tecnologías fotovoltaicas más comunes en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, las cuales representan la mayor participación del mercado y la mayor proyección en términos de generación de residuos fotovoltaicos:

- Silicio monocristalino (mono-Si),
- Silicio policristalino (poli-Si),

- Telururo de cadmio (CdTe),
- Diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS).

Las tecnologías basadas en silicio cristalino dominan actualmente el mercado global debido a su madurez tecnológica, alta eficiencia y estabilidad operativa. Por su parte, las tecnologías de película delgada, como CdTe y CIGS, presentan ventajas en costos y flexibilidad, pero incorporan materiales que requieren un análisis ambiental más riguroso durante su gestión como residuo.

3.1 Composición material de la celda fotovoltaica y relevancia para la gestión de residuos

La celda fotovoltaica constituye el elemento activo del módulo solar, siendo la responsable directa de la conversión de la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Su estructura está conformada por una combinación de materiales semiconductores y conductores dispuestos en capas delgadas, diseñadas para optimizar la captación de fotones y la recolección de carga eléctrica.

En el caso de las celdas de silicio cristalino, que representan la tecnología más utilizada a nivel mundial, la composición típica de la celda se distribuye de la siguiente manera [4, 5, 26]:

- **Silicio cristalino (mono o poli):** aproximadamente 90–95% del volumen de la celda, constituyendo el material semiconductor base donde se genera el efecto fotovoltaico.
- **Capas dopadas tipo p y n (boro y fósforo):** menos del 1%, responsables de la formación de la unión PN y del establecimiento del campo eléctrico interno que permite la separación de cargas.
- **Contactos metálicos frontales y posteriores (plata, aluminio y cobre):** entre 3–5%, utilizados para la recolección, conducción y extracción de la corriente eléctrica generada en la celda.
- **Capa antirreflectiva (generalmente nitruro de silicio, SiNx):** menos del 1%, aplicada para reducir las pérdidas por reflexión y mejorar la absorción de la radiación solar incidente.

En las tecnologías de película delgada, como CdTe y CIGS, la composición de la celda difiere significativamente. En estos casos, el material semiconductor activo se deposita en capas muy delgadas sobre un sustrato de vidrio, y puede incluir compuestos como telururo de cadmio (CdTe) o diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), junto con capas conductoras transparentes (TCO) y contactos metálicos posteriores [9, 26]. La baja cantidad de material activo por unidad de área contrasta con la presencia de elementos potencialmente tóxicos.

La identificación precisa de la composición material de la celda resulta fundamental para los procesos de evaluación ambiental y disposición final, ya que la presencia de metales pesados como cadmio, plomo o selenio condiciona la clasificación del módulo fotovoltaico como residuo de manejo especial o RAEE peligroso. Esta diferenciación tecnológica y material se incorpora directamente en el protocolo de evaluación propuesto, permitiendo definir criterios técnicos y ambientales específicos para la clasificación, reutilización, reparación o disposición final de los módulos fotovoltaicos evaluados.

4. Revisión normativa y análisis comparado

El desarrollo del protocolo técnico propuesto se fundamenta en un marco normativo nacional e internacional que establece criterios de seguridad, desempeño, calidad y gestión ambiental para los módulos fotovoltaicos y sus residuos. La aplicación de estas normas permite garantizar que los criterios físicos, eléctricos y ambientales definidos en el protocolo estén alineados con estándares reconocidos y buenas prácticas del sector.

A continuación, se describen las principales normativas consideradas y su relación directa con los criterios de evaluación del presente estudio.

4.1 IEC 61215 – Calificación de diseño y aprobación de tipo

La norma IEC 61215 establece los procedimientos de ensayo y los requisitos mínimos de desempeño para la calificación de diseño de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino y otras tecnologías. Su objetivo principal es verificar la resistencia del módulo frente a condiciones ambientales adversas, como ciclos térmicos, humedad, radiación ultravioleta y cargas mecánicas.

En el contexto del protocolo desarrollado, esta norma sirve como referencia para la evaluación del deterioro físico y funcional del módulo, especialmente en la interpretación de fallas como delaminación, microfracturas, degradación del encapsulante (EVA) y pérdida de potencia. Asimismo, los valores nominales de potencia, tensión en circuito abierto (Voc) y corriente de cortocircuito (Isc) definidos por el fabricante se contrastan con base en los parámetros establecidos por esta norma.

4.2 IEC 61730 – Seguridad de módulos fotovoltaicos

La norma IEC 61730 se enfoca en los requisitos de seguridad eléctrica y mecánica de los módulos fotovoltaicos, con el fin de minimizar riesgos de choque eléctrico, incendio y daños estructurales durante su operación. Esta norma evalúa aspectos como el aislamiento eléctrico, la integridad del backsheet, la resistencia del encapsulado y la seguridad de la caja de conexión.

Dentro del protocolo técnico, la IEC 61730 respalda los criterios de clasificación inmediata como irrecuperable o RAEE peligroso en casos donde se detecten perforaciones del backsheet, exposición de conductores, fallas en la caja de conexión o riesgos eléctricos evidentes durante la inspección física.

4.3 Directiva 2012/19/EU (WEEE)

La Directiva 2012/19/EU sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE) establece el marco regulatorio europeo para la gestión integral de residuos electrónicos, incluyendo de forma explícita los módulos fotovoltaicos. Esta directiva promueve la responsabilidad extendida del productor, la trazabilidad del residuo y la priorización de la reutilización y el reciclaje.

En este trabajo, la Directiva WEEE se utiliza como referencia conceptual y técnica para definir las rutas de clasificación y disposición final de los módulos evaluados, así como para justificar la necesidad de protocolos técnicos que permitan decidir entre reutilización, reparación, reciclaje o disposición controlada.

4.4 Ley 1672 de 2013 (Colombia)

La Ley 1672 de 2013 establece en Colombia los lineamientos para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), asignando responsabilidades a productores, comercializadores, gestores y usuarios finales. Esta ley constituye la base legal para la clasificación de los módulos fotovoltaicos fuera de uso como RAEE.

En el protocolo propuesto, esta normativa respalda la clasificación de los módulos como RAEE cuando han perdido su funcionalidad o presentan riesgos ambientales, así como la obligación de su entrega a gestores autorizados para su tratamiento y disposición final.

4.5 Resolución 851 de 2022

La Resolución 851 de 2022 reglamenta aspectos específicos de la gestión de RAEE en Colombia, incluyendo metas de recolección, tratamiento y aprovechamiento, así como criterios técnicos para su manejo. Esta resolución refuerza la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan caracterizar adecuadamente los residuos electrónicos.

El protocolo desarrollado aporta un enfoque técnico complementario a esta resolución, al proporcionar criterios objetivos para la evaluación del estado físico, eléctrico y ambiental de los módulos fotovoltaicos antes de su disposición final.

4.6 Recomendaciones de IRENA e IEA-PVPS

Las recomendaciones emitidas por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y el programa IEA-PVPS constituyen referentes técnicos internacionales en la gestión del fin de vida útil de los módulos fotovoltaicos. Estos documentos abordan aspectos como proyecciones de residuos, tecnologías de reciclaje, riesgos ambientales y estrategias de economía circular.

En este estudio, dichas recomendaciones se emplean como marco de validación del protocolo, asegurando que los criterios definidos sean coherentes con las tendencias internacionales y las mejores prácticas para la gestión responsable de residuos fotovoltaicos.

En conjunto, el marco normativo descrito sustenta técnicamente el protocolo de evaluación propuesto, garantizando que las decisiones de clasificación y disposición final de los módulos fotovoltaicos se realicen bajo criterios normativos, técnicos y ambientales reconocidos.

5. Diseño del protocolo técnico

El protocolo técnico propuesto se diseñó como una herramienta integral de apoyo a la toma de decisiones, orientada a la evaluación sistemática de módulos fotovoltaicos al término de su vida útil. Su diseño integra los fundamentos físicos, eléctricos, ambientales y normativos analizados en los capítulos anteriores.

El protocolo articula los siguientes componentes:

- criterios físicos para evaluar la integridad estructural del módulo,
- criterios eléctricos basados en parámetros medibles y comparables,

- criterios ambientales asociados a la composición material,
- una matriz multicriterio que pondera las variables críticas,
- un formato técnico de inspección que garantiza trazabilidad,
- rutas de disposición final claramente definidas,
- diagramas de flujo que estructuran la secuencia de decisiones.

Esta integración permite clasificar los módulos fotovoltaicos como operativos, reparables o irrecuperables de manera objetiva, reproducible y alineada con las buenas prácticas de gestión de residuos fotovoltaicos, facilitando su aplicación en contextos reales de operación, mantenimiento y gestión ambiental.

5.1 Matriz multicriterio de clasificación

La matriz multicriterio se aplica únicamente a los módulos fotovoltaicos que no presentan riesgo ambiental asociado a la presencia de materiales peligrosos. En caso de identificarse dicho riesgo, el módulo se clasifica directamente como RAEE peligroso, sin necesidad de aplicar ponderación adicional.

Cuadro 6.4: Matriz de decisión técnica integrada al protocolo

Variable	Criterio	Peso	Puntaje (0–10)	Resultado
Rendimiento eléctrico	Pérdida de P_{max}	0.45	·	Peso × Puntaje
Voc / Isc	Desviación respecto al valor nominal	0.15	·	Peso × Puntaje
Integridad física	Vidrio, marco, EVA, backsheet	0.25	·	Peso × Puntaje
Condición de reparabilidad	Fallas localizadas	0.15	·	Peso × Puntaje

Asignación del puntaje eléctrico

El puntaje asociado al criterio eléctrico se determina a partir de los resultados obtenidos en el diagnóstico eléctrico del módulo fotovoltaico (Flujo 2). La potencia máxima medida (P_{max}) constituye el principal indicador del desempeño funcional del panel, razón por la cual concentra el mayor peso dentro de la matriz multicriterio.

La comparación se realiza entre la potencia medida y la potencia nominal del fabricante, bajo condiciones estándar de prueba o mediante correcciones apropiadas. El puntaje se asigna según los siguientes rangos:

- $P_{max} \geq 85\%$ del valor nominal: Puntaje = 9–10
- $70\% \leq P_{max} < 85\%$: Puntaje = 7–8
- $50\% \leq P_{max} < 70\%$: Puntaje = 4–6
- $P_{max} < 50\%$: Puntaje = 0–3

Los parámetros eléctricos complementarios tensión de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}) se emplean como indicadores de desviaciones específicas asociadas a degradación del semiconductor, fallas en interconexiones internas o defectos en diodos bypass. Su peso relativo es menor, ya que su función es ajustar el diagnóstico eléctrico sin sobrerrepresentar su influencia.

Asignación del puntaje para V_{oc} e I_{sc} :

- Desviación $\leq 5\%$ respecto al valor nominal: Puntaje = 9–10
- Desviación entre 5–10%: Puntaje = 6–8
- Desviación entre 10–20%: Puntaje = 3–5
- Desviación $> 20\%$: Puntaje = 0–2

Esta metodología permite traducir resultados eléctricos cuantitativos en un puntaje normalizado (0–10), garantizando coherencia entre el diagnóstico técnico y la clasificación final del módulo fotovoltaico.

5.1.1 Síntesis del método de asignación de pesos

Los pesos de la matriz multicriterio (0.45 para rendimiento eléctrico, 0.15 para V_{oc}/I_{sc} , 0.25 para integridad física y 0.15 para condición de reparabilidad) se obtuvieron mediante un proceso de comparación por pares inspirado en el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) [31], un método ampliamente utilizado en estudios de toma de decisión multicriterio para gestión de residuos y evaluación de activos técnicos al final de su vida útil. El criterio de jerarquización utilizado fue el siguiente:

1. **Capacidad de indicar directamente el valor funcional y económico del módulo:** la potencia máxima (P_{max}) es el parámetro que de forma más directa determina si el módulo puede seguir generando energía de manera competitiva, y es además el único criterio estandarizado y trazable metrológicamente (IEC 61215). Por esta razón recibe el peso dominante (0.45).
2. **Capacidad de comprometer la seguridad o la reutilización de forma irreversible:** la integridad física determina si el módulo puede manipularse, transportarse o reinstalarse de forma segura, y sus fallas —a diferencia de las eléctricas— no suelen ser reversibles mediante mantenimiento de campo. Recibe el segundo mayor peso (0.25).

3. **Capacidad de refinar o explicar el criterio principal:** Voc e Isc no aportan información independiente de la potencia ($P_{max} = f(V_{oc}, I_{sc}, FF)$), sino que ayudan a diagnosticar la causa de una pérdida de potencia ya detectada. Se ponderan como criterio complementario (0.15).
4. **Capacidad de modificar la decisión final tras una intervención:** la reparabilidad es un criterio condicional que solo aplica cuando ya se identificó una falla localizada; su función es ajustar la clasificación después de una intervención técnica, por lo que recibe el mismo peso que el criterio complementario (0.15).

La consistencia de esta jerarquización se validó cualitativamente comprobando que ningún criterio de menor jerarquía pueda, por sí solo, revertir una clasificación de *irrecuperable* originada en un criterio de mayor jerarquía; por ejemplo, un buen puntaje de reparabilidad no puede compensar una fractura de vidrio, que se trata como descalificante directo según lo descrito en el numeral 2.2.

Cuadro 6.5: Síntesis de variables, unidades de medida y pesos de la matriz multicriterio

Variable	Medida / unidad	Peso	Instrumento	Fuente del criterio
Rendimiento eléctrico (P_{max})	% de $P_{nominal}$ (STC)	0.45	Trazador de curva I-V	IEC 61215; NREL [25]
Voc / Isc	% de desviación vs. ficha técnica	0.15	Trazador de curva I-V	IEC 60904-1
Integridad física	Escala cualitativa 0–10 según checklist de daños	0.25	Inspección visual + registro fotográfico	IEC 61730
Condición de reparabilidad	Escala cualitativa 0–10 según localización/severidad	0.15	Termografía IR + electroluminiscencia	IEC TS 60904-13

Ejemplo numérico de aplicación. Considérese un módulo con P_{max} medida al 78 % de la nominal (puntaje 7), desviación de Voc/IsC de 6 % (puntaje 7), integridad física sin daños descalificantes (puntaje 9) y una falla localizada de un diodo bypass ya reparada con verificación exitosa (puntaje 8):

$$\text{Resultado} = (0.45 \times 7) + (0.15 \times 7) + (0.25 \times 9) + (0.15 \times 8) = 3.15 + 1.05 + 2.25 + 1.20 = 7.65 \quad (6.1)$$

Dado que $7.65 \geq 6.0$, la clasificación final del módulo es **Operativo** (véase el criterio de decisión de la Figura 6.6).

5.2 Recomendaciones técnicas para la aplicación del diagrama de flujo

Con el fin de garantizar la correcta aplicación del protocolo de evaluación y reducir la variabilidad en la toma de decisiones, se establecen una serie de recomendaciones técnicas asociadas a cada una

de las etapas del diagrama de flujo. Estas recomendaciones buscan asegurar la reproducibilidad del proceso, la confiabilidad de los resultados y la adecuada clasificación de los módulos fotovoltaicos evaluados.

Recomendaciones para la inspección física:

- Utilizar iluminación lateral y frontal durante la inspección visual, con el objetivo de mejorar la detección de delaminación, microfracturas y deformaciones estructurales.
- Aplicar un protocolo fotográfico estandarizado que documente el estado inicial de cada módulo antes de su manipulación o traslado.
- Realizar la manipulación de los módulos utilizando guantes anticorte y elementos de protección personal, especialmente en paneles con vidrio comprometido.
- Clasificar de manera inmediata como irrecuperable cualquier módulo que presente rotura completa del vidrio frontal o pérdida de integridad estructural.
- Mantener una separación física entre módulos dañados y módulos en buen estado para evitar riesgos de contaminación cruzada o daños adicionales.

Recomendaciones para el diagnóstico eléctrico:

- Ejecutar la inspección termográfica al menos 20 minutos después de la exposición solar, con el fin de mejorar el contraste térmico y la identificación de hot-spots.
- Verificar la correcta calibración de los equipos de termografía y electroluminiscencia antes de cada sesión de medición.
- Registrar de manera digital las curvas I-V obtenidas y compararlas con las curvas nominales suministradas por el fabricante del módulo.
- Realizar las mediciones bajo condiciones estandarizadas (STC) o aplicar los factores de corrección térmica correspondientes para validar los resultados eléctricos.
- En módulos que hayan sido sometidos a procesos de reparación, repetir las pruebas eléctricas con el fin de verificar la efectividad de la intervención realizada.

Recomendaciones para la decisión final y la clasificación del módulo:

- Confirmar la tecnología fotovoltaica del módulo mediante la etiqueta del fabricante, ficha técnica o, en caso de duda, mediante análisis complementarios.
- Aplicar criterios de manejo especializado en módulos de tecnologías CdTe o CIGS, independientemente de su estado funcional, debido a la presencia de materiales de manejo especial.
- Validar la aplicación de la matriz multicriterio con al menos dos evaluadores cuando sea posible, con el fin de aumentar la confiabilidad del puntaje asignado.
- Documentar el puntaje final obtenido y respaldar la decisión con evidencia técnica como fotografías, curvas eléctricas y registros de medición.

- En los casos clasificados como RAEE peligroso, garantizar el transporte directo del módulo hacia un gestor autorizado y certificado, conforme a la normativa vigente.

5.3 Diagrama de flujo del protocolo

La primera etapa del protocolo corresponde a la inspección física inicial del módulo fotovoltaico, cuyo objetivo es identificar de forma temprana condiciones de riesgo estructural, eléctrico y ambiental que puedan comprometer la seguridad del proceso de evaluación y la gestión posterior del panel.

Como primer punto de verificación, se evalúa el estado del backsheet, dado que este componente constituye la principal barrera de aislamiento eléctrico y protección ambiental del módulo. La presencia de delaminación severa, perforaciones, fisuras profundas o exposición de capas internas puede indicar riesgo de fuga eléctrica, ingreso de humedad o liberación de materiales potencialmente peligrosos.

Paralelamente, en esta etapa inicial se identifica la tecnología del panel (Si-mono, Si-poli, Cd-Te o CIGS), mediante la etiqueta del fabricante, ficha técnica o inspección visual especializada. Esta identificación temprana es fundamental para determinar la posible presencia de materiales peligrosos, tales como cadmio, plomo o selenio, asociados principalmente a tecnologías de película delgada.

En caso de detectarse deterioro crítico del backsheet en módulos que contienen materiales peligrosos, el panel se clasifica de manera inmediata como RAEE de manejo especial, evitando su manipulación innecesaria y garantizando su remisión directa a un gestor autorizado.

Si el módulo supera esta primera verificación ambiental y estructural, se procede a la inspección física detallada, la cual incluye la revisión del vidrio frontal, el marco, las soldaduras y la caja de conexión. Esta etapa permite descartar unidades con daños mecánicos severos o riesgos eléctricos evidentes antes de continuar con la evaluación eléctrica. El flujo completo correspondiente a esta fase se presenta en la Figura 6.4.

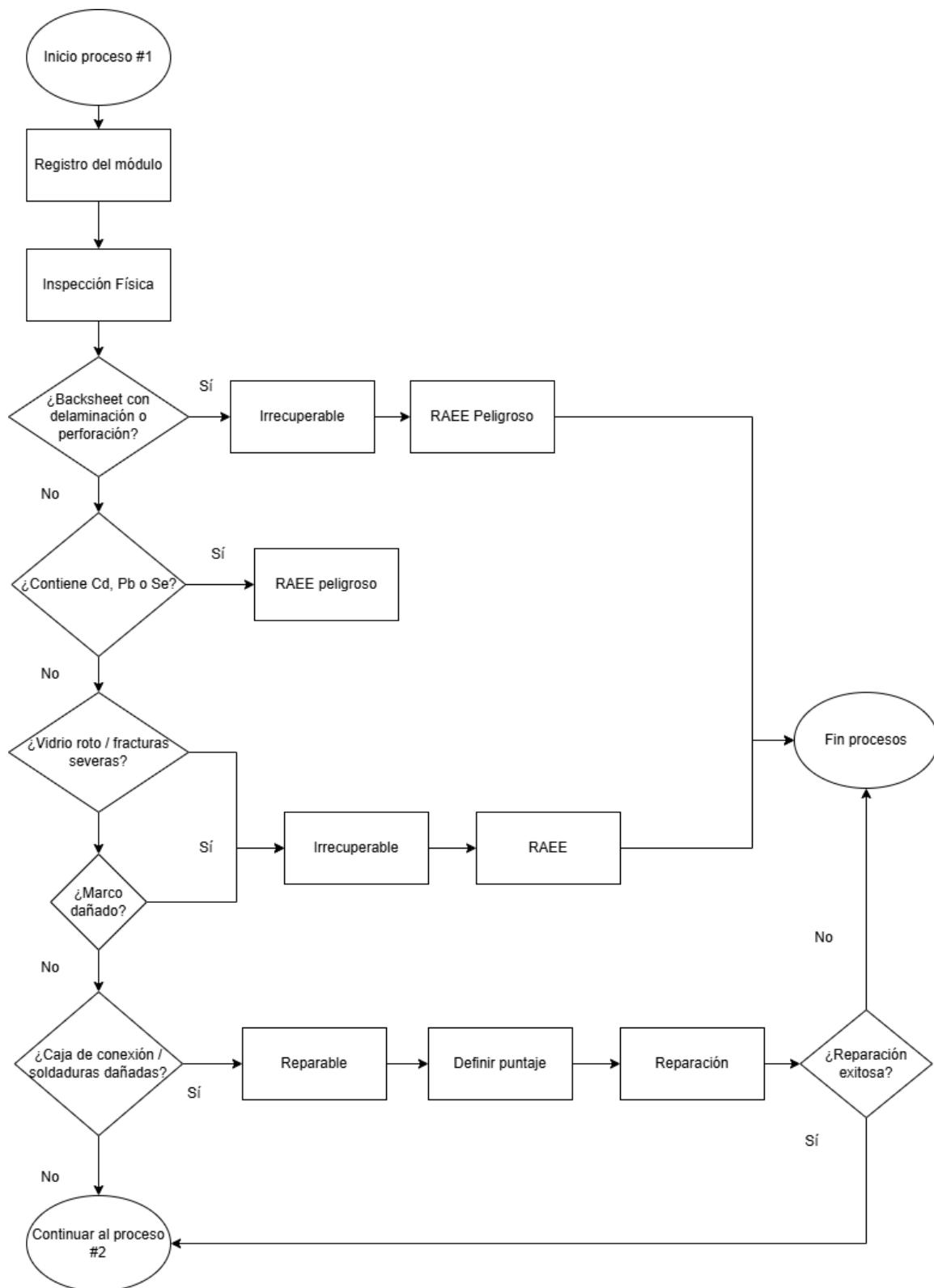


Figura 6.4: Inspección física del módulo fotovoltaico

La segunda etapa del protocolo corresponde a la **evaluación eléctrica del módulo fotovoltaico**, cuyo objetivo es diagnosticar su estado funcional mediante técnicas no destructivas y ensayos eléctricos estandarizados, permitiendo identificar fallas internas no evidentes durante la inspección visual o estructural.

El criterio eléctrico del protocolo se fundamenta en las normas internacionales **IEC 61215** e **IEC 61730**, las cuales establecen los requisitos mínimos de desempeño, seguridad y límites de degradación admisible de los módulos fotovoltaicos en operación. Adicionalmente, se incorporan lineamientos técnicos reportados por organismos internacionales como **IEA-PVPS** e **IRENA**, enfocados en la evaluación de módulos al final de su vida útil y en la toma de decisiones para su reutilización, reacondicionamiento o disposición final.

La secuencia de evaluación eléctrica inicia con la **termografía infrarroja (IR)**, técnica que permite identificar puntos calientes (*hot-spots*), fallas en diodos bypass, resistencias anómalas y conexiones defectuosas bajo condiciones reales de operación. Esta prueba se utiliza como primer filtro eléctrico debido a su carácter no invasivo, rapidez de aplicación y capacidad para detectar defectos que podrían generar degradación acelerada o riesgos de seguridad. El procedimiento completo se presenta en la Figura 6.5.

Cuando se detecta un diferencial térmico superior a 20 °C respecto a las celdas adyacentes, el módulo es clasificado como **reparable** y se somete a una intervención técnica específica, la cual puede incluir la sustitución de diodos bypass, corrección de conexiones internas o mitigación de resistencias de contacto. Posteriormente, se realiza una nueva termografía IR con el fin de verificar la efectividad de la intervención. La reparación se considera exitosa cuando el defecto térmico inicial ha sido mitigado y no se evidencia un punto caliente crítico persistente. En caso contrario, el módulo se descarta de esta etapa y se clasifica para disposición final.

Posteriormente, se aplica el **ensayo de electroluminiscencia (EL)**, ejecutado según el método de polarización directa en corriente continua normalizado en la especificación técnica IEC TS 60904-13 (numeral 5.2.2.2 del Marco de Referencia), orientado a la detección de microfisuras, células eléctricamente inactivas, fallas en las interconexiones y degradación interna del semiconductor. Esta técnica permite diferenciar defectos estructurales irreversibles de fallas localizadas susceptibles de reacondicionamiento. El barrido diagnóstico inicial se realiza a una corriente cercana a I_{sc} ($1 \times I_{sc}$); cuando se identifican microfisuras o zonas inactivas, el módulo es clasificado como **reparable** y se somete a acciones de estabilización eléctrica o aislamiento funcional, tras lo cual se repite el ensayo EL —preferiblemente a corriente reducida ($0.1 \times I_{sc}$), que resalta el contraste de microfisuras finas según el Anexo C de la norma— para confirmar la no propagación del daño.

Superada la evaluación térmica y estructural interna, el módulo es sometido a la **medición completa de la curva corriente–voltaje (I–V)**, a partir de la cual se determinan los parámetros eléctricos fundamentales: potencia máxima (P_{max}), tensión de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}) y factor de forma (FF). Los valores obtenidos se comparan con los datos nominales del fabricante, aplicando correcciones por temperatura e irradiancia cuando corresponde.

Con base en estos resultados, el módulo se clasifica eléctricamente según los siguientes umbrales:

- **Operativo:** $P_{medida} \geq 85\%$ de $P_{nominal}$, apto para continuar en operación normal.
- **Reutilizable:** $50\% \leq P_{medida} < 85\%$, sin fallas críticas de seguridad, apto para aplicaciones de menor exigencia energética.

- **Reparable:** Módulos con P_{medida} intermedia y fallas localizadas identificables, susceptibles de intervención técnica única.
- **Irrecuperable:** $P_{\text{medida}} < 50\%$ o presencia de fallas eléctricas generalizadas que comprometen la seguridad y confiabilidad del módulo.

La evaluación posterior a la reparación se realiza una única vez con el fin de validar la efectividad de la intervención y cerrar el proceso de clasificación, evitando ciclos repetitivos de evaluación. Los resultados obtenidos en esta etapa alimentan directamente la matriz multicriterio, aportando el puntaje correspondiente al desempeño eléctrico e integrándose con los criterios físicos y estructurales del protocolo.

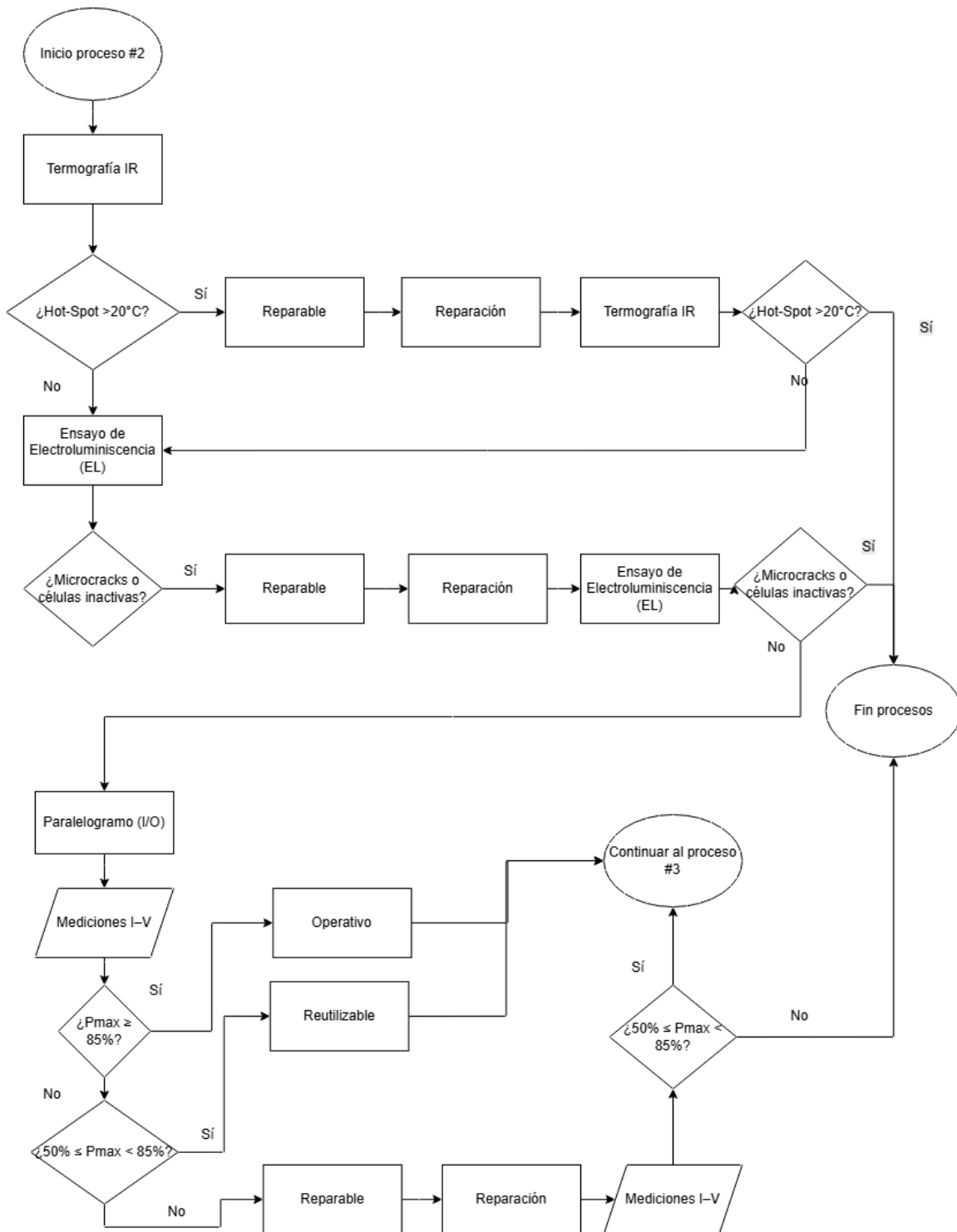


Figura 6.5: Diagnóstico eléctrico del módulo fotovoltaico

La tercera etapa del protocolo corresponde a la **clasificación final del módulo fotovoltaico**, a partir de la consolidación de los resultados obtenidos en la inspección física (Flujo 1) y el diagnóstico eléctrico con validación de reparación (Flujo 2).

En esta etapa no se realizan nuevas pruebas ni intervenciones técnicas. El objetivo es integrar los resultados previamente obtenidos mediante la aplicación de la matriz multicriterio, la cual permite asignar una clasificación final estandarizada y trazable.

El puntaje global obtenido representa el estado funcional real del módulo tras haber superado —o no— los procesos de reparación y verificación. Con base en este puntaje, el módulo se clasifica únicamente como **operativo** o **irrecuperable**, definiendo su destino final en términos de reinstalación, reutilización controlada o gestión como residuo RAEE.

La Figura 6.6 presenta el flujo lógico de decisión correspondiente a esta etapa final del protocolo.

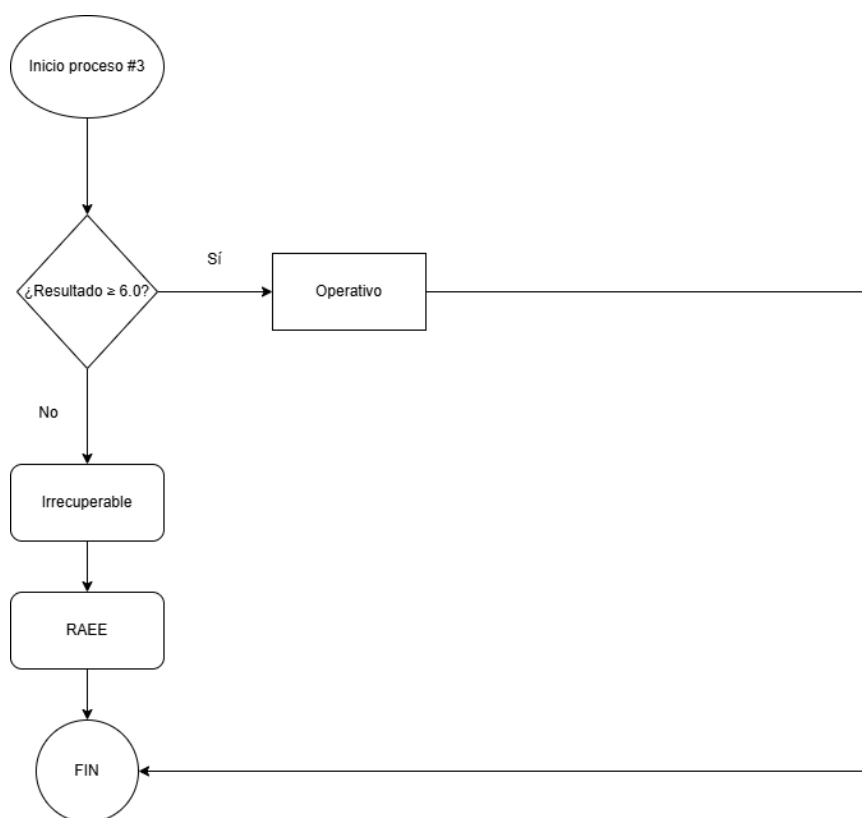


Figura 6.6: Proceso 3: Evaluación ambiental y decisión final mediante matriz multicriterio

Para facilitar la comprensión de los flujos presentados anteriormente, se resume a continuación el objetivo y alcance de cada una de las etapas del protocolo.

Cuadro 6.6: Resumen técnico de las etapas del protocolo de evaluación de paneles solares

Etapas del Proceso	Aspectos evaluados	Resultados esperados
1. Inspección física	Integridad estructural y seguridad del módulo	Detección de daños críticos y decisión de descarte o continuidad
2. Evaluación eléctrica	Diagnóstico funcional y validación de reparabilidad	Determinación del estado eléctrico real del módulo
3. Clasificación final	Integración de resultados y normalización	Definición objetiva de la ruta final del módulo

En conjunto, los tres flujos conforman un sistema integral de evaluación secuencial que evita la duplicidad de decisiones y garantiza coherencia técnica. La incorporación de una matriz multicriterio en la etapa final reduce la subjetividad del proceso y facilita la trazabilidad de cada decisión, alineando la gestión de módulos fotovoltaicos con principios de economía circular y con el marco normativo colombiano.

6. Técnicas de análisis y validación

Con el fin de garantizar la solidez técnica, la coherencia normativa y la aplicabilidad del protocolo propuesto, se aplicó un conjunto de técnicas de análisis y validación que permitieron evaluar de manera crítica cada uno de sus componentes. Estas técnicas aseguran que los criterios definidos no sean arbitrarios, sino que se encuentren sustentados en referentes técnicos reconocidos, lineamientos normativos vigentes y principios de validación metodológica.

Las técnicas de análisis y validación aplicadas fueron las siguientes:

- **Análisis de contenido de literatura técnica:** se realizó una revisión sistemática de literatura científica y técnica relacionada con la degradación de módulos fotovoltaicos, técnicas de diagnóstico eléctrico, reciclaje y gestión al final de la vida útil. El objetivo fue identificar variables relevantes, umbrales de desempeño y buenas prácticas reportadas en estudios previos, que sirvieran como base para la definición de los criterios físicos, eléctricos y de clasificación empleados en el protocolo [4].
- **Validación por consistencia normativa:** los criterios y decisiones incorporados en el protocolo fueron contrastados con la normativa internacional y nacional vigente, incluyendo directrices sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), recomendaciones de organismos internacionales y normas técnicas aplicables al sector fotovoltaico. Esta validación permitió asegurar que el protocolo se encuentra alineado con los marcos regulatorios existentes y que no contradice los principios normativos establecidos [24, 25].
- **Comparación con protocolos internacionales:** se realizó un análisis comparado entre el protocolo propuesto y enfoques internacionales para la gestión de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil, considerando guías técnicas, estudios de caso y proyectos de investigación

especializados. Esta comparación permitió identificar similitudes, diferencias y aportes del protocolo desarrollado frente a prácticas consolidadas a nivel internacional [11, 27, 13].

- **Pruebas de sensibilidad de la matriz multicriterio:** se evaluó el comportamiento de la matriz multicriterio frente a variaciones en los puntajes y ponderaciones asignadas a cada criterio, con el fin de analizar la estabilidad del resultado final y reducir la influencia de la subjetividad en la clasificación de los módulos fotovoltaicos.
- **Revisión técnica cruzada:** se verificó la coherencia interna del protocolo mediante la revisión cruzada de los criterios físicos, eléctricos y de decisión final, asegurando que las etapas del proceso se encuentren correctamente articuladas y que los resultados obtenidos en cada fase sean consistentes entre sí.

La aplicación conjunta de estas técnicas permitió validar el protocolo desde una perspectiva técnica, normativa y metodológica, garantizando su viabilidad como herramienta práctica para la evaluación, clasificación y definición de la ruta de disposición final de módulos fotovoltaicos al término de su vida útil. Asimismo, este capítulo proporciona el soporte metodológico que sustenta los resultados y el análisis presentados en el capítulo siguiente.

7. Relación directa con los resultados

El Capítulo 7 (Resultados y Discusión) se deriva de manera directa, lógica y coherente de los elementos metodológicos definidos a lo largo del presente capítulo. Los resultados obtenidos no constituyen observaciones aisladas, sino que corresponden a la aplicación sistemática y estructurada de los criterios, herramientas y procedimientos establecidos en el protocolo técnico propuesto para la evaluación de módulos fotovoltaicos.

En este sentido, cada resultado presentado en el capítulo de resultados se encuentra respaldado por decisiones metodológicas previamente justificadas, garantizando la trazabilidad entre el diseño del protocolo, su aplicación y los hallazgos obtenidos. En particular, los resultados se fundamentan en los siguientes componentes metodológicos:

- Los **umbrales eléctricos definidos**, los cuales permiten cuantificar el nivel de degradación funcional de los módulos fotovoltaicos a partir de parámetros medibles, tales como potencia máxima, voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito, facilitando su clasificación objetiva según el desempeño real.
- Los **criterios físicos cuantificados**, empleados para identificar daños estructurales, defectos visibles y condiciones que representan riesgos mecánicos o eléctricos, los cuales inciden directamente en la seguridad, funcionalidad y viabilidad de recuperación del módulo.
- El **análisis de las tecnologías fotovoltaicas**, que condiciona tanto la interpretación de los resultados eléctricos como la evaluación ambiental, al considerar las particularidades constructivas y la posible presencia de materiales peligrosos asociados a determinadas tecnologías.

- La **matriz multicriterio**, mediante la cual se integran de forma ponderada los criterios físicos, eléctricos y de reparabilidad, permitiendo reducir la subjetividad en la toma de decisiones y obtener un puntaje global que respalda la clasificación final de cada módulo evaluado.
- El **diagrama de flujo del protocolo**, que establece la secuencia lógica de evaluación y decisión, asegurando la coherencia del proceso y la trazabilidad de cada etapa desde la inspección inicial hasta la definición de la ruta final del módulo.
- La **clasificación en categorías operativas** (operativo, reparable, irrecuperable y RAEE peligroso), que constituye el resultado integrador del proceso de evaluación técnica y sintetiza el estado funcional, estructural y ambiental de los módulos analizados.
- El **marco normativo comparado**, que permite interpretar los resultados obtenidos bajo criterios regulatorios y de gestión ambiental reconocidos, asegurando que las decisiones finales se encuentren alineadas con la normativa vigente y las buenas prácticas internacionales.

De esta manera, el Capítulo 7 presenta resultados que son la consecuencia directa de la aplicación del protocolo metodológico desarrollado, garantizando la coherencia entre el planteamiento metodológico, el análisis realizado y las conclusiones derivadas del estudio. Esta relación directa refuerza la validez interna del trabajo y sustenta la viabilidad del protocolo como una herramienta técnica para la gestión responsable de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil.

Resultados y Discusión

Los resultados presentados en este capítulo corresponden a la aplicación integral del protocolo metodológico desarrollado en el Capítulo 6, el cual articula criterios físicos, eléctricos, materiales y normativos en un sistema estructurado de evaluación de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil. La implementación del protocolo permitió realizar una clasificación técnica objetiva de los paneles solares, definir rutas de intervención diferenciadas y establecer criterios claros para su reutilización, reparación, reciclaje o disposición final como residuo RAEE.

El enfoque adoptado supera los métodos tradicionales basados exclusivamente en la potencia remanente del módulo, al incorporar variables estructurales, eléctricas y ambientales que inciden directamente en la seguridad operativa, el desempeño funcional y el impacto ambiental del sistema fotovoltaico.

7.1 Resultados de la clasificación técnica integrada

La aplicación secuencial de los diagramas de flujo correspondientes a la inspección física, el diagnóstico eléctrico y la evaluación ambiental, junto con la matriz multicriterio de clasificación, permitió categorizar los módulos fotovoltaicos evaluados en cuatro categorías técnicas claramente diferenciadas: operativo, reparable, irrecuperable y RAEE peligroso.

Esta clasificación evidencia la pertinencia de un enfoque integrado, ya que módulos con niveles similares de potencia remanente pueden presentar condiciones estructurales, eléctricas o materiales que modifican de manera significativa su destino final. En este sentido, los resultados confirman que la evaluación aislada del parámetro eléctrico ($P_{\max}$) resulta insuficiente para una gestión responsable de los residuos fotovoltaicos.

7.2 Análisis técnico por categoría de clasificación

7.2.1 Paneles clasificados como operativos

Los paneles clasificados como operativos corresponden a aquellos cuya potencia medida es igual o superior al 85% de la potencia nominal del fabricante, y que no presentan defectos estructurales ni fallas eléctricas significativas identificadas durante la inspección física ni el diagnóstico eléctrico.

Desde el punto de vista técnico, estos módulos conservan condiciones adecuadas de desempeño y no representan riesgos mecánicos ni eléctricos durante su operación. El destino recomendado para esta categoría es la **reinstalación, reubicación o extensión de la vida útil**, ya sea en sistemas fotovoltaicos existentes o en aplicaciones secundarias de menor exigencia energética, en concordancia con los principios de economía circular y las recomendaciones internacionales para la gestión de módulos fotovoltaicos al final de su primera vida útil [4, 5].

7.2.2 Paneles clasificados como reparables

Los paneles clasificados como reparables presentan pérdidas de potencia comprendidas entre el 15% y el 50% de su valor nominal, asociadas principalmente a fallas localizadas y técnicamente intervinibles. Entre las fallas más frecuentes identificadas se encuentran diodos bypass defectuosos, soldaduras deterioradas en las interconexiones, daños menores en el marco estructural y envejecimiento del encapsulante EVA sin evidencia de delaminación profunda.

Desde un enfoque ingenieril, estos módulos conservan una estructura funcional susceptible de recuperación, por lo que su reacondicionamiento permite restituir parcialmente el desempeño eléctrico y prolongar su vida útil. Este tipo de intervención técnica ha sido documentado en experiencias internacionales, particularmente en plantas europeas y latinoamericanas que priorizan la reutilización de módulos frente a su reciclaje prematuro [11, 27].

7.2.3 Paneles clasificados como irrecuperables

Los paneles clasificados como irrecuperables corresponden a módulos que presentan daños estructurales severos, tales como fracturas del vidrio frontal, delaminación profunda del encapsulante, deformaciones críticas del marco o daños irreversibles en la caja de conexión, así como pérdidas eléctricas significativas con valores de potencia inferiores al 50% de la potencia nominal.

Desde el punto de vista técnico y de seguridad, estos módulos no garantizan condiciones mínimas de operación ni viabilidad de reparación. En consecuencia, su gestión debe orientarse al aprovechamiento de materiales mediante procesos controlados de desensamble y reciclaje, priorizando la recuperación de vidrio, aluminio y cobre, y minimizando su disposición final en rellenos sanitarios.

7.2.4 Paneles clasificados como RAEE peligroso

La categoría de RAEE peligroso corresponde principalmente a módulos fabricados con tecnologías de película delgada, como CdTe y CIGS, así como a módulos que presentan degradación severa del backsheet con exposición de materiales potencialmente peligrosos. Entre los elementos de mayor preocupación ambiental se encuentran el cadmio, el selenio, el indio y el plomo presente en soldaduras y contactos eléctricos.

Independientemente del estado funcional del módulo, la presencia de estos materiales condiciona su clasificación y exige un manejo especializado conforme a la normativa vigente. Estos módulos deben ser gestionados exclusivamente por operadores autorizados, garantizando procesos adecuados de transporte, tratamiento y disposición final que minimicen los riesgos ambientales y a la salud humana [10, 9].

7.3 Integración del protocolo con principios de economía circular

El protocolo técnico propuesto contribuye de manera directa a la implementación de principios de economía circular en el sector fotovoltaico, al priorizar la reutilización y reparación de módulos funcionales antes de su reciclaje o disposición final. Entre los principales aportes del protocolo se destacan la prolongación de la vida útil de los módulos, el incremento del aprovechamiento de

materiales valorizables, la reducción del volumen de residuos enviados a rellenos sanitarios, la mejora en la trazabilidad del manejo de residuos RAEE y la alineación con directrices internacionales como la Directiva WEEE.

7.4 Discusión comparada con experiencias internacionales

Los resultados obtenidos presentan una alta coherencia con estudios y experiencias reportadas a nivel internacional. Las proyecciones de IRENA, que estiman hasta 78 millones de toneladas de residuos fotovoltaicos para el año 2050, refuerzan la necesidad de implementar protocolos de clasificación técnica previos al reciclaje [4].

Asimismo, iniciativas como el proyecto PHOTORAMA y experiencias industriales en Europa, incluida la planta de reciclaje de Puertollano en España, evidencian que la evaluación previa del estado del módulo constituye un paso crítico para optimizar la recuperación de materiales y reducir costos operativos. En este contexto, el protocolo desarrollado se encuentra alineado con las mejores prácticas internacionales.

7.5 Clasificación técnica resultante y rutas de disposición

Con base en la aplicación integral del protocolo, se estableció una clasificación técnica que orienta la disposición final de los módulos fotovoltaicos evaluados. La Tabla 7.1 resume las rutas de tratamiento recomendadas según la categoría obtenida, evidenciando la necesidad de una categorización previa para evitar disposiciones incorrectas y promover prácticas sostenibles de gestión de residuos.

Cuadro 7.1: Clasificación técnica resultante y rutas de disposición recomendadas

Categoría	Criterio de origen	Ruta de disposición recomendada
Operativo	$P_{max} \geq 85\% P_{nom}$; sin daños físicos ni riesgos ambientales	Reinstalación, reubicación o extensión de vida útil
Reparable	$50\% \leq P_{max} < 85\%$ con fallas localizadas intervinientes	Reacondicionamiento técnico y reevaluación posterior
Irrecuperable	$P_{max} < 50\%$ o daño estructural severo	Desensamble controlado y reciclaje de materiales (vidrio, aluminio, cobre)
RAEE peligroso	Presencia de Cd, Pb o Se, o backsheet comprometido	Transporte directo a gestor RAEE autorizado

7.6 Análisis de costos de disposición final

La literatura técnica revisada en el marco teórico no incluye cifras de costo; estas se incorporan aquí a partir de reportes de la industria del reciclaje fotovoltaico y de estudios técnico-económicos internacionales, dado que no se identificaron cifras publicadas específicas para el contexto colombiano. Esta ausencia de datos locales se señala como una limitación del presente trabajo y se retoma como línea de investigación futura en el Capítulo 9 (Recomendaciones).

Cuadro 7.2: Estructura referencial de costos de disposición final y reciclaje de paneles fotovoltaicos

Componente	Rango reportado	Fuente
Recolección / desmontaje	USD 0.05 – 0.25 por vatio instalado, según accesibilidad del sitio	[32]
Transporte	USD 1 000 – 2 000 por contenedor (300–500 paneles); o USD 20 – 150 por panel en operaciones pequeñas	[32, 33]
Procesamiento / reciclaje (<i>gate fee</i>)	USD 6 – 28 por panel; equivalente a $\approx$ USD 12.43/m ² de material recuperado sin considerar beneficio ambiental	[33, 34]
Costo evitado incorporando beneficio ambiental	Reducción hasta $\approx$ USD 1.19/m ² de material recuperado	[34]
Costo total por panel al usuario final (referencia EE. UU.)	USD 10 – 40 por panel (residencial, 20–40 paneles)	[33]
Costo de materiales vírgenes evitados (referencia)	$\approx$ USD 90/m ² de módulo equivalente	[34]

De la lectura conjunta de estos datos se destacan tres implicaciones para el protocolo propuesto. Primero, el costo de transporte es, en la mayoría de los reportes, el componente más sensible a la ubicación del punto de generación del residuo, lo cual refuerza la pertinencia de una clasificación previa que evite transportar innecesariamente módulos que podrían reutilizarse localmente. Segundo, la comparación entre el costo de materiales vírgenes ($\approx$ USD 90/m²) y el de materiales recuperados ($\approx$ USD 12.43/m², o $\approx$ USD 1.19/m² incluyendo beneficios ambientales) evidencia el margen económico que sustenta la priorización de la reutilización y el reciclaje frente a la disposición en relleno sanitario, en línea con la Directiva WEEE y los principios de economía circular descritos en el marco teórico. Tercero, la experiencia de la planta de Puertollano (España), ya citada en el apartado de

trabajos relacionados (capacidad de hasta 6 800 t/año, operación promedio 3 000 t/año), permite dimensionar de forma comparativa la escala de inversión necesaria para una eventual infraestructura similar en Colombia, aunque su viabilidad económica local debe validarse con datos propios –tal como se propone en el plan piloto del Capítulo 9.

7.7 Conclusiones del análisis de resultados

Los resultados evidencian que la clasificación técnica previa de los módulos fotovoltaicos es indispensable para evitar el envío innecesario de paneles funcionales a procesos de reciclaje prematuro. La matriz multicriterio demostró ser una herramienta objetiva, robusta y replicable, mientras que los diagramas de flujo facilitan la toma de decisiones técnicas en campo.

El protocolo desarrollado responde al marco normativo colombiano y constituye una herramienta aplicable a gestores RAEE, instaladores, empresas de mantenimiento y entidades reguladoras, fortaleciendo la gestión responsable de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil.

Conclusiones

El presente trabajo permitió desarrollar y proponer un **protocolo técnico para la evaluación, clasificación y disposición final de paneles solares al término de su vida útil**, orientado a establecer criterios objetivos, reproducibles y técnicamente verificables para la gestión responsable de estos residuos en el contexto colombiano.

A partir del análisis técnico, normativo y ambiental realizado, se derivan las siguientes conclusiones principales:

- El protocolo desarrollado constituye una herramienta técnica integral, práctica y adaptable, que facilita la toma de decisiones sobre el destino final de los módulos fotovoltaicos, garantizando trazabilidad del proceso, control técnico de los criterios aplicados y alineación con la normativa ambiental vigente.
- A partir del análisis de la literatura técnica y de la aplicación conceptual del protocolo propuesto, se identifica que una proporción relevante de los módulos fotovoltaicos retirados de operación puede conservar niveles de eficiencia funcional superiores al 80% de su potencia nominal, según lo reportado en estudios internacionales. En este contexto, la evaluación técnica estructurada planteada en el presente trabajo permite **identificar de manera objetiva oportunidades de reutilización o reacondicionamiento**, contribuyendo a la reducción de la generación innecesaria de residuos y a la disminución de los costos asociados al reemplazo prematuro de módulos fotovoltaicos [1, 2, 3].
- La recuperación de materiales valorizables como vidrio, aluminio y cobre representa una oportunidad relevante de aprovechamiento económico y reducción del impacto ambiental, al disminuir la demanda de materias primas vírgenes y los impactos asociados a su extracción y procesamiento.
- La aplicación del protocolo contribuye a suplir la ausencia de lineamientos técnicos específicos para la gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia, consolidándose como una preferencia metodológica coherente con la Directiva Europea WEEE y con la Ley 1672 de 2013 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
- El enfoque propuesto se articula de manera directa con los principios de **economía circular y sostenibilidad**, al priorizar la extensión de la vida útil de los módulos solares, la reparación y la reutilización sobre el reciclaje y la disposición final, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y emisiones asociadas a una gestión inadecuada de estos residuos.
- Finalmente, se confirma la **viabilidad técnica y operativa del protocolo** para su implementación en empresas instaladoras, mantenedoras y gestoras de residuos, así como su

potencial para servir como base técnica en el diseño de futuras políticas públicas y estrategias nacionales orientadas a la gestión integral de tecnologías fotovoltaicas.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y del análisis del protocolo técnico propuesto, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer su aplicación práctica, promover principios de economía circular y consolidar una gestión sostenible de los residuos fotovoltaicos en el contexto colombiano. Estas recomendaciones buscan facilitar la adopción del protocolo por parte de actores públicos y privados, así como potenciar su impacto técnico, ambiental y normativo.

- **Implementar planes piloto en condiciones reales de operación**, en alianza con empresas del sector solar, gestores RAEE o centros de investigación, con el fin de validar el desempeño del protocolo en escenarios reales y ajustar los criterios técnicos según las particularidades del parque fotovoltaico nacional.
- **Desarrollar una plataforma digital nacional de trazabilidad**, que permita registrar el estado, la clasificación técnica y el destino final de los módulos fotovoltaicos evaluados, facilitando el control ambiental, la generación de estadísticas y el seguimiento institucional del flujo de residuos solares.
- **Promover incentivos económicos, tributarios y regulatorios** que fomenten la reutilización, reparación y reciclaje de módulos fotovoltaicos, incentivando la participación del sector privado y reduciendo las barreras económicas asociadas a la gestión técnica de residuos RAEE.
- **Fortalecer la capacitación técnica del talento humano**, mediante programas de formación especializada en diagnóstico eléctrico, reparación, desensamble y manejo seguro de módulos fotovoltaicos, garantizando la correcta aplicación del protocolo y el cumplimiento de las normas de seguridad y ambientales vigentes.
- **Establecer alianzas estratégicas entre el sector académico, industrial y gubernamental**, orientadas a fortalecer la infraestructura nacional de reciclaje, desarrollar centros piloto de investigación y fomentar la transferencia de conocimiento en tecnologías de recuperación de materiales fotovoltaicos.
- **Ampliar el alcance del protocolo hacia otros componentes del sistema fotovoltaico**, como inversores, baterías, estructuras metálicas y sistemas de monitoreo, promoviendo una gestión integral de todos los elementos que conforman las instalaciones solares al final de su vida útil.

La implementación progresiva de estas recomendaciones permitiría consolidar el protocolo como una herramienta técnica de referencia a nivel nacional, contribuyendo al desarrollo de una cadena de valor circular en el sector fotovoltaico y al fortalecimiento de la gestión ambiental de residuos tecnológicos en Colombia.

9.1 Propuesta detallada de plan piloto de validación

A continuación se desarrolla en detalle la primera recomendación del capítulo –“Implementar planes piloto en condiciones reales de operación”– como una propuesta técnica completa para una futura fase de validación del protocolo.

Objetivo del piloto

Validar en condiciones reales de operación la aplicabilidad, reproducibilidad y utilidad para la toma de decisiones del protocolo técnico propuesto, sobre una muestra representativa de módulos fotovoltaicos retirados de instalaciones en Colombia, y ajustar los umbrales y pesos de la matriz multicriterio con base en evidencia empírica local.

Alcance y actores propuestos

- **Institución líder:** Pontificia Universidad Javeriana Cali (Facultad de Ingeniería y Ciencias), como articulador técnico y académico del piloto.
- **Socios técnicos sugeridos:** empresas instaladoras y de mantenimiento de sistemas fotovoltaicos en el Valle del Cauca, un gestor de RAEE autorizado ante la autoridad ambiental regional y, de ser posible, un operador de generación solar distribuida o de escala industrial dispuesto a ceder módulos retirados.
- **Muestra propuesta:** entre 50 y 100 módulos fotovoltaicos fuera de servicio, de al menos dos tecnologías (silicio mono/policristalino y, si es posible, una muestra de película delgada), procedentes de instalaciones residenciales, comerciales e industriales.
- **Ámbito geográfico inicial:** Cali y el Valle del Cauca, con posibilidad de escalar a otras regiones en una segunda fase.

Fases y cronograma propuesto (12 meses)

Cuadro 9.1: Cronograma propuesto para el plan piloto de validación del protocolo

Fase	Duración	Actividades principales
0. Alistamiento	1 mes	Convenios con socios, adquisición/alquiler de equipos (cámara termográfica, equipo EL, trazador I-V), capacitación del equipo evaluador.
1. Línea base	2 meses	Recolección de la muestra, aplicación completa del protocolo (Procesos 1–3) sin modificaciones, registro en el formato del Anexo 1.
2. Intervención	4 meses	Ejecución de reparaciones sobre módulos clasificados como reparables; verificación post-reparación (termografía IR y EL).
3. Validación y ajuste	3 meses	Análisis estadístico de resultados, prueba de sensibilidad de la matriz con datos reales, contraste entre evaluadores (repetibilidad), ajuste de umbrales si corresponde.
4. Cierre y difusión	2 meses	Elaboración de informe técnico, propuesta de protocolo versión 2.0, socialización con UPME, gestores RAEE y autoridad ambiental.

Indicadores de éxito (KPI)

- Porcentaje de módulos reclasificados de *reparable* a *operativo* tras la intervención técnica.
- Costo promedio de evaluación y, en su caso, de reparación por módulo, comparado con el costo de disposición directa como RAEE (véase el análisis de costos del Capítulo 7).
- Nivel de concordancia (repetibilidad) entre evaluadores independientes al aplicar la matriz multicriterio sobre el mismo módulo.
- Toneladas de residuo evitado (módulos reincorporados a operación) y toneladas de material valorizado (vidrio, aluminio, cobre) enviado a reciclaje.
- Tiempo promedio de aplicación completa del protocolo por módulo, como insumo para estimar la escalabilidad operativa.

Recursos requeridos

Cámara termográfica infrarroja, equipo de electroluminiscencia (fuente DC + cámara NIR, conforme a IEC TS 60904-13), trazador de curva I-V portátil, elementos de protección personal, transporte

de módulos y disposición final de los clasificados como irrecuperables o RAEE peligroso a través del gestor autorizado. Se recomienda gestionar la financiación mediante convocatorias de investigación aplicada (por ejemplo, Minciencias o regalías de CTeI) o alianzas con el sector privado, dado que buena parte del instrumental (termografía, EL) puede compartirse con otros proyectos de mantenimiento de plantas fotovoltaicas en operación.

Entregables esperados

- Protocolo técnico validado (versión 2.0) con umbrales y pesos ajustados a evidencia empírica local.
- Base de datos abierta con los resultados de la evaluación de la muestra piloto.
- Documento técnico de recomendaciones dirigido a UPME y a la autoridad ambiental, como insumo para una futura reglamentación específica de RAEE fotovoltaico en Colombia, retomando el vacío normativo identificado en el Marco de Referencia.

CAPÍTULO 10

Anexos

10.1 Anexo 1 – Formato detallado de aplicación del protocolo técnico para paneles solares

El presente formato tiene como finalidad registrar de manera sistemática la evaluación técnica, la clasificación y la disposición final de los paneles solares al término de su vida útil, conforme a los lineamientos establecidos en el protocolo técnico desarrollado en este trabajo.

Este instrumento permite documentar de forma estructurada las condiciones físicas, eléctricas, materiales y ambientales de los módulos fotovoltaicos evaluados, facilitando la trazabilidad del proceso y asegurando que la toma de decisiones se base en criterios técnicos objetivos, verificables y alineados con la normativa ambiental vigente.

Campo	Descripción / Ejemplo
Fecha de evaluación	Día / Mes / Año en que se realiza la inspección técnica.
Responsable técnico	Nombre, cargo y datos de contacto del evaluador.
Ubicación	Dirección, municipio y coordenadas geográficas del sitio.
Identificación del panel	Código interno, número de serie o identificación única.
Fabricante / Modelo	Marca comercial y referencia del módulo.
Tipo de panel	Monocrystalino / Policristalino / CdTe / CIGS.
Potencia nominal (W)	Valor indicado por el fabricante en la ficha técnica.
Año de instalación / fabricación	Según etiqueta, documentación o registro disponible.
Dimensiones (cm)	Largo × ancho × espesor del módulo.
Peso (kg)	Peso aproximado o medido del panel.
Condiciones ambientales del sitio	Nivel de exposición solar, humedad, polvo y temperatura.
Estado físico general	Sin daños / Daños leves / Daños severos / Irrecuperable.
Daños observados	Grietas, delaminación, puntos calientes, corrosión, deformación del marco, entre otros.
Estado eléctrico	Medición de Voc, Isc y Pmax, comparados con los valores nominales.
Porcentaje de degradación (%)	Diferencia porcentual entre la potencia nominal y la potencia medida.
Diagnóstico técnico	Resultado de la evaluación: operativo, reparable o irreparable.

Campo	Descripción / Ejemplo (continuación)
Clasificación del residuo	Reutilizable / Reacondicionable / Reciclable / RAEE peligroso.
Tratamiento recomendado	Reparación, reacondicionamiento, reciclaje o disposición final.
Destino sugerido	Reutilización interna, venta, donación o entrega a gestor RAEE autorizado.
Gestor o entidad receptora	Nombre de la empresa o entidad y licencia ambiental correspondiente.
Observaciones adicionales	Comentarios técnicos, registros fotográficos o anotaciones relevantes.
Firma del responsable técnico	Firma, nombre y sello del evaluador.

Cuadro 10.1: Formato guía para la aplicación del protocolo técnico de clasificación de paneles solares al final de su vida útil.

Descripción de los campos del formato de aplicación

Con el fin de garantizar la correcta interpretación del formato de aplicación del protocolo técnico, a continuación se describen los campos incluidos en la Tabla del Anexo 1, explicando su función y relevancia dentro del proceso de evaluación y clasificación de los paneles solares.

- **Fecha de evaluación:** permite registrar el momento en que se realiza la inspección técnica, facilitando la trazabilidad del proceso y el seguimiento histórico del estado del módulo.
- **Responsable técnico:** identifica al profesional encargado de la evaluación, garantizando la responsabilidad técnica y la validez del diagnóstico realizado.
- **Ubicación:** documenta el sitio donde se encuentra el panel, información clave para análisis ambientales, logísticos y de gestión territorial del residuo.
- **Identificación del panel:** permite individualizar cada módulo mediante un código o número de serie, evitando confusiones y facilitando el control documental.
- **Fabricante / Modelo:** proporciona información técnica del módulo, necesaria para consultar fichas técnicas, valores nominales y características de diseño.
- **Tipo de panel:** identifica la tecnología fotovoltaica utilizada, lo cual condiciona tanto la interpretación del desempeño eléctrico como la evaluación ambiental y la clasificación como residuo RAEE.

- **Potencia nominal (W):** corresponde a la potencia declarada por el fabricante bajo condiciones estándar, utilizada como referencia para el cálculo de la degradación.
- **Año de instalación / fabricación:** permite estimar la edad del módulo y relacionarla con los mecanismos de degradación esperados.
- **Dimensiones y peso:** facilitan la planificación del transporte, almacenamiento, desensamble y reciclaje del panel.
- **Condiciones ambientales del sitio:** registra factores externos que influyen en la degradación del módulo, como humedad, polvo y temperatura.
- **Estado físico general:** resume la condición estructural del panel, considerando la presencia de daños visibles que puedan comprometer la seguridad o funcionalidad.
- **Daños observados:** detalla de manera específica los defectos identificados durante la inspección física, aportando evidencia para la clasificación técnica.
- **Estado eléctrico:** recoge los resultados de las mediciones eléctricas realizadas, comparándolas con los valores nominales del fabricante.
- **Porcentaje de degradación:** cuantifica la pérdida de desempeño eléctrico del módulo, constituyendo uno de los criterios centrales de clasificación.
- **Diagnóstico técnico:** integra los resultados físicos y eléctricos para definir la condición operativa del panel.
- **Clasificación del residuo:** determina la categoría final del módulo (reutilizable, reacondicionable, reciclable o RAEE peligroso), conforme al protocolo.
- **Tratamiento recomendado:** establece la acción técnica más adecuada según la clasificación obtenida.
- **Destino sugerido:** orienta la ruta de gestión del panel, asegurando el cumplimiento normativo y ambiental.
- **Gestor o entidad receptora:** identifica al operador autorizado encargado del manejo del módulo al final de su vida útil.
- **Observaciones adicionales:** permite registrar información complementaria que respalde el diagnóstico, como fotografías o anotaciones técnicas.
- **Firma del responsable técnico:** valida formalmente el proceso de evaluación y la veracidad de la información registrada.

Esta descripción fortalece el carácter metodológico del formato, asegurando su correcta aplicación, reproducibilidad y validez como instrumento técnico dentro del protocolo propuesto.

10.2 Anexo 2 – Guía paso a paso para la aplicación de los diagramas de flujo

Esta guía traduce las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 del Capítulo 6 en una secuencia operativa que el técnico evaluador puede seguir en campo, en formato de lista de verificación (*checklist*).

Paso 0. Preparación

1. Verificar que el módulo esté desconectado del sistema y sea seguro de manipular (uso de guantes anticorte y elementos de protección personal).
2. Diligenciar el encabezado del formato del Anexo 1 (fecha, responsable, ubicación, identificación del panel).
3. Registrar fotográficamente el estado general del módulo antes de cualquier manipulación.

Paso 1. Proceso 1 – Inspección física (Figura 6.4)

1. Registrar el módulo (código, fabricante, modelo, tecnología declarada).
2. Inspeccionar el *backsheet* con iluminación lateral. Si presenta delaminación o perforación → clasificar como Irrecuperable / RAEE Peligroso y finalizar el proceso.
3. Confirmar la tecnología del panel (etiqueta o ficha técnica). Si contiene Cd, Pb o Se → clasificar como RAEE Peligroso y finalizar el proceso.
4. Inspeccionar el vidrio frontal. Si presenta rotura o fracturas severas → clasificar como Irrecuperable / RAEE y finalizar el proceso.
5. Inspeccionar el marco. Si está dañado → clasificar como Irrecuperable / RAEE y finalizar el proceso.
6. Inspeccionar la caja de conexión y soldaduras visibles. Si hay daño → clasificar como Reparable, definir puntaje preliminar y ejecutar la reparación; si la reparación es exitosa, continuar; si no, remitir a Fin de proceso.
7. Si el módulo supera las verificaciones 2 a 6 sin hallazgos → continuar al Proceso 2 (Figura 6.5).

Paso 2. Proceso 2 – Diagnóstico eléctrico (Figura 6.5)

1. Ejecutar termografía infrarroja (IR) tras al menos 20 minutos de exposición solar o bajo carga eléctrica estabilizada.
2. Si se detecta un diferencial térmico $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a celdas adyacentes (*hot-spot*) → clasificar como Reparable, intervenir (diodo bypass / conexiones) y repetir la termografía IR. Si el defecto persiste → finalizar el proceso (disposición); si se corrige → continuar.

3. Ejecutar el ensayo de electroluminiscencia (EL) a $1 \times I_{sc}$, según el procedimiento descrito en el numeral 5.2.2.2 del Marco de Referencia (IEC TS 60904-13).
4. Si se detectan microfisuras o células inactivas $\rightarrow$ clasificar como Reparable, intervenir (reconfiguración de *strings* / aislamiento funcional) y repetir el ensayo EL, preferiblemente a $0.1 \times I_{sc}$. Si el defecto persiste $\rightarrow$ finalizar el proceso; si se corrige $\rightarrow$ continuar.
5. Medir la curva I-V completa y obtener P_{max} , V_{oc} , I_{sc} y FF, corrigiendo por temperatura e irradiancia.
6. Comparar P_{max} medida contra $P_{nominal}$: si $\geq 85\%$ $\rightarrow$ Operativo; si está entre 50% y 85% $\rightarrow$ Reutilizable / Reparable (intervenir y repetir la medición I-V una única vez); si $< 50\%$ $\rightarrow$ finalizar el proceso (disposición).
7. Con el resultado consolidado, continuar al Proceso 3 (Figura 6.6).

Paso 3. Proceso 3 – Clasificación final (Figura 6.6)

1. Calcular el puntaje global de la matriz multicriterio (Cuadro 6.2 y numeral 5.1.1 del Capítulo 6) a partir de los resultados de los Procesos 1 y 2.
2. Si el resultado ≥ 6.0 $\rightarrow$ clasificación final: Operativo.
3. Si el resultado < 6.0 $\rightarrow$ clasificación final: Irrecuperable $\rightarrow$ gestionar como RAEE.
4. Diligenciar los campos finales del formato del Anexo 1 (diagnóstico técnico, clasificación del residuo, tratamiento recomendado, destino sugerido, gestor receptor) y firmar.

Recomendación de trazabilidad

Se recomienda que cada paso quede respaldado con evidencia fotográfica o el registro digital de la curva I-V/imagen EL correspondiente, y que, cuando sea posible, la aplicación de la matriz multicriterio sea revisada por un segundo evaluador, tal como se indica en las recomendaciones técnicas del numeral 5.2 del Capítulo 6.

Bibliografía

- [1] H. L. y J. Romero, *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed., ser. Sixth Assessment Report (AR6). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023.
- [2] U. N. E. Programme, *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*, 13th ed. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2022.
- [3] U. de Planeación Minero Energética (UPME), *Estimación de volúmenes de residuos fotovoltaicos*. UPME, 2022.
- [4] P. CYCLE, *Annual Report on PV Module Recycling in Europe*. PV CYCLE, 2020.
- [5] M. Tao *et al.*, “Photovoltaic waste assessment and intelligent sorting techniques,” *Journal of Renewable Energy Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 165–179, 2020.
- [6] IRENA, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, 1st ed. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023.
- [7] K. Gerold and H. Antrekowitsch, “Recycling of photovoltaic modules: Challenges and future developments,” *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1512, 2024.
- [8] Sustainability Today. (2024) Why only 10% of solar panels are recycled—and how that can change. [Online]. Available: <https://www.sustainability-today.com/articles/solar-panel-recycling-2024>
- [9] V. Forti, C. P. Balde, R. Kuehr, and G. Bel, *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU), 2020.
- [10] A. Kumar, R. Bhattacharya, and A. Sinha, “Recycling of photovoltaic solar panels: A review of recycling techniques and implications,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 314, p. 128016, 2021.
- [11] United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) and International Telecommunication Union (ITU), “Global e-waste monitor 2024: Electronic waste rising five times faster than documented e-waste recycling,” UNITAR & ITU, Bonn/Geneva, Tech. Rep., 2024.
- [12] A. I. de Energía (AIE), *La AIE predice un escenario de alto coste y bajos ingresos para el reciclaje solar*. PV Magazine, 2022.
- [13] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221–232, 2017.

- [14] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall, 2000.
- [16] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press, 2003.
- [17] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,” Abu Dhabi, 2019.
- [18] IEA-PVPS, “Review of failures of photovoltaic modules,” 2014.
- [19] M. Kempe, “Modeling of rates of moisture ingress into photovoltaic modules,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 16, pp. 2720–2738, 2006.
- [20] European Parliament and Council, “Directive 2012/19/eu on waste electrical and electronic equipment (weee),” Official Journal of the European Union, Tech. Rep., 2012.
- [21] Clean Energy Reviews. (2023) Solar panel components and construction. Consultado en 2026. [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [22] International Electrotechnical Commission (IEC), “Iec ts 60904-13:2018 – photovoltaic devices – part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules,” IEC, Tech. Rep., 2018, especifica los métodos de captura, procesamiento e interpretación de imágenes de electroluminiscencia de módulos fotovoltaicos polarizados en directa.
- [23] IRENA and IEA-PVPS, *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. International Renewable Energy Agency, 2016.
- [24] IRENA and IEA-PVPS, “End-of-life management of solar pv panels,” International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS), Abu Dhabi, Tech. Rep., 2016, 1st ed. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- [25] Jordan, D. C., Kurtz, S. R., Bolinger, M., and O’Shaughnessy, E., “Photovoltaic degradation rates: An analytical review and global update 2023,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-81661, 2023, informe técnico actualizado sobre tasas de degradación de módulos fotovoltaicos. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81661.pdf>
- [26] L. M. S. García, “Desarrollo de un protocolo para la adecuada gestión de raee procedentes de paneles fotovoltaicos en colombia,” Master’s thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2024.

- [27] PHOTORAMA Consortium, “Photovoltaic waste management – advanced technologies for recovery and recycling of secondary raw materials from end-of-life modules (photorama),” Proyecto financiado por la Comisión Europea bajo Horizon 2020, Grant Agreement No. 958223, 2021–2025, coordinado por Commissariat à l’Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (Francia). Objetivo: desarrollar un modelo circular para la gestión de residuos fotovoltaicos y recuperación de materiales críticos (Si, Ag, In, Ga) con tecnología TRL 4–7. DOI: 10.3030/958223. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/958223>
- [28] M. Solar, “Microcracks on solar panels – inspection & prevention guide,” <https://www.maysunsolar.com/blog-microcracks-on-solar-panels-inspection-prevention-guide-2024/>, 2024, consultado el 07/03/2026.
- [29] SFE Solar. (2025) Puntos calientes en paneles solares. Consultado en 2025. [Online]. Available: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/puntos-calientes/>
- [30] A. Luque and S. Hegedus, “Handbook of photovoltaic science and engineering,” *John Wiley & Sons*, 2011.
- [31] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, 1980.
- [32] Okon Recycling. (2025) Solar panel recycling cost: Key insights. [Online]. Available: <https://www.okonrecycling.com/renewables-recycling/solar-panel-recycling/solar-panel-recycling-cost/>
- [33] Well Built Florida. (2026) Solar panel disposal costs and pricing guide 2026. [Online]. Available: <https://wellbuiltflorida.com/solar-panel-disposal-costs-pricing/>
- [34] Chemical Abstracts Service (CAS). (2026) How to improve solar panel recycling. Incluye datos del proyecto europeo FRELP (Full Recovery End of Life Photovoltaic). [Online]. Available: <https://www.cas.org/resources/cas-insights/solar-panel-recycling>