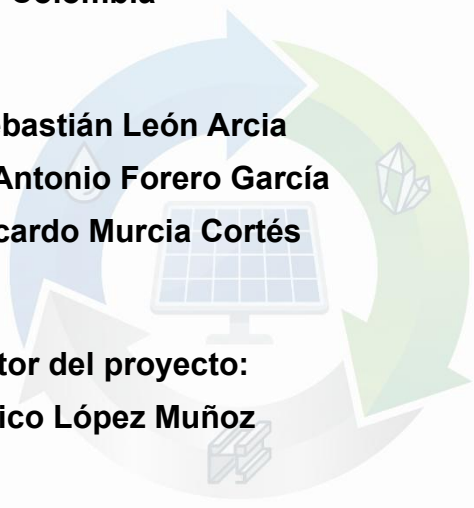


UNIVERSIDAD EAN
Facultad de Administración, Finanzas y Ciencias Económicas
Facultad de Ingeniería

GUÍA TÉCNICA ORIENTADORA

Para la gestión sostenible de residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia



Juan Sebastián León Arcia
Fernando Antonio Forero García
David Ricardo Murcia Cortés

Director del proyecto:
Federico López Muñoz

Versión: 2.0 | Bogotá D.C., Colombia | 2026

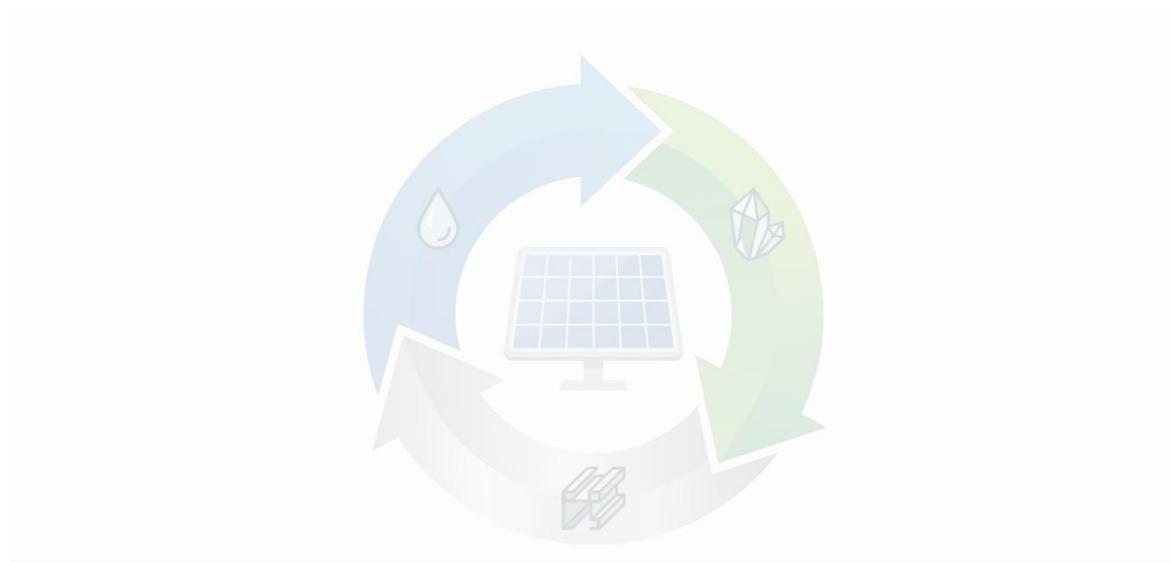
Documento técnico vinculado al artículo de investigación:

Diseño y validación de una guía técnica orientadora para la gestión sostenible de residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
ALCANCE	7
GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS Y DEFINICIONES	12
FASE 1. RETIRO DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO Y VERIFICACIÓN TÉCNICA INICIAL	19
1. Objetivo de la fase	19
2. Condiciones de inicio y seguridad previa al retiro	19
3. Identificación del escenario de retiro	20
4. Procedimiento técnico de retiro del módulo	20
5. Verificación técnica inicial del módulo retirado	29
6. Salida de la fase	40
FASE 2. MANEJO LOGÍSTICO DEL MÓDULO RETIRADO (MANIPULACIÓN, EMBALAJE Y TRANSPORTE)	42
1. Objetivo de la fase	42
2. Manipulación segura de los módulos para ejecutar el proceso logístico	42
3. Embalaje de los módulos	43
4. Manejo diferenciado / especializado, según la condición del módulo	48
5. Transporte de módulos fotovoltaicos	51
6. Almacenamiento temporal (condicional)	59
7. Salida de la fase	64
FASE 3. PRETRATAMIENTO DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO (REMOCIÓN DE CABLES, CONECTORES Y CAJA DE CONEXIONES)	65
1. Objetivo de la fase	65
2. Preparación del área de trabajo	65
3. Remoción de cables y conectores	69
4. Remoción de la caja de conexiones (Junction Box)	75
5. Segregación inicial de materiales	75
6. Verificación posterior al pretratamiento	76
7. Salida de la fase	76
FASE 4. DESENSAMBLE DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO (SEPARACIÓN DEL MARCO Y PREPARACIÓN DEL MÓDULO PARA RECUPERACIÓN DE MATERIALES)	77
1. Objetivo de la fase	77
2. Remoción del marco de aluminio	77
3. Separación del vidrio frontal	79
4. Método recomendado para el contexto colombiano	79
5. Salida de la fase	86
FASE 5. TRATAMIENTO DEL LAMINADO FOTOVOLTAICO (RECUPERACIÓN DE MATERIALES PRESENTES EN CELDAS Y ENCAPSULANTE)	87
1. Objetivo de la fase	87
2. Composición del laminado fotovoltaico	88
3. Reducción de tamaño del laminado	89
4. Separación de fracciones metálicas	93
5. Recuperación de silicio	94
6. Gestión de fracciones poliméricas	97
7. Equipos utilizados en el tratamiento del laminado y EPP	99
8. Salida de la fase	101
FASE 6. GESTIÓN DE FRACCIONES RESIDUALES Y VALORIZACIÓN FINAL (CIERRE DEL PROCESO DE RECICLAJE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS)	102
1. Objetivo de la fase	102
2. Fracciones resultantes del proceso de reciclaje	102
3. Valorización de materiales recuperados	109
4. Gestión de fracciones poliméricas	111

5.	Rutas de gestión alternativas — protocolo transitorio para gestores sin infraestructura específica en módulos FV	112
6.	Control del proceso y trazabilidad de materiales	113
7.	Salida de la fase.....	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		119



LISTA DE TABLAS

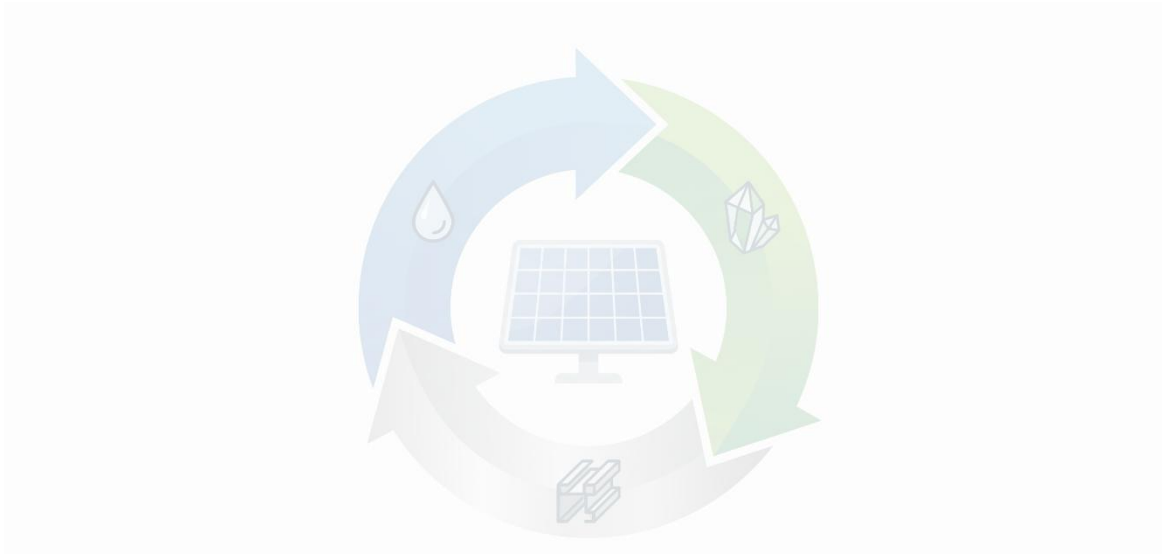
Tabla 1. Fases consideradas dentro del alcance de la guía técnica orientadora	8
Tabla 2. Actores responsables por fase en el proceso de gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia 8	
Tabla 3. Procedimiento de verificación de ausencia de tensión DC en módulo fotovoltaico mediante multímetro. 20	
Tabla 4. Seccionador DC en posición OFF con candado de bloqueo (lockout/tagout) y etiqueta de señalización instalados	21
Tabla 5. Secuencia de aflojamiento cruzado de abrazaderas en el sistema de montaje (racking) 22	
Tabla 6. Retiro de abrazaderas del sistema de montaje.....	23
Tabla 7. Manipulación segura del módulo fotovoltaico tras su liberación de la estructura	23
Tabla 8. Orientación y apilamiento de módulos en la zona de acopio	24
Tabla 9. Sistema de identificación y trazabilidad interna del módulo fotovoltaico retirado	25
Tabla 10. Doble registro de trazabilidad del módulo fotovoltaico retirado	26
Tabla 11. Modelo de registro de retiro (para diligenciar en campo).....	27
Tabla 12. Herramientas e instrumentos a utilizar en la fase 1	28
Tabla 13. EPP a utilizar en fase 1	28
Tabla 14. Lista de verificación previa al inicio del retiro	29
Tabla 15. Condiciones a inspeccionar: Fractura de vidrio frontal, delaminación, deformación del marco, daño en caja de conexiones y cables y conectores	30
Tabla 16. Tabla resumen, clasificación y acción por condición observada	35
Tabla 17. Señales de falla típicas	36
Tabla 18. Clasificación operativa de los módulos	40
Tabla 19. Indicadores cumplimiento fase 1	40
Tabla 20. Insumos o equipos de la estructura de soporte fase 2	44
Tabla 21. Insumos de protección y separación — condiciones de uso según zona climática de Colombia	44
Tabla 22. Insumos y equipos para fijar al pallet en fase 2	45
Tabla 23. Herramientas y equipos de maneja en fase 2.....	45
Tabla 24. EPP a utilizar durante el embalaje en fase 2	46
Tabla 25. Resumen insumos requeridos según clasificación del módulo	46
Tabla 26. Elementos de embalaje reforzado para transporte en Contextos ZNI (B, C y D)	47
Tabla 27. Clasificación según afectación del módulo y precauciones ISO aplicables.	49
Tabla 28. Normas ISO referenciadas, descripción y aplicación específica	50
Tabla 29. Protocolo de embalaje según región climática colombiana y nivel de riesgo para el embalaje FV	51
Tabla 30. Clasificación del contexto de acceso y protocolo de transporte aplicable	52
Tabla 31. Ficha técnica camioneta de carga tipo furgón o doble cabina con plataforma	53
Tabla 32. Ficha técnica camión de carga liviana (3,5 t – 8 t) con furgón o carpa.....	54
Tabla 33. Ficha técnica camión de carga pesada (> 8 t) con trailer o plataforma	55
Tabla 34. Aptitud de vehículos según condiciones climáticas — transporte de módulos fotovoltaicos en Colombia	56
Tabla 35. Selección rápida de vehículo según volumen y clasificación	57
Tabla 36. Buenas prácticas y prácticas a evitar durante el transporte	57
Tabla 37. Protocolos de embalaje y transporte para medios no convencionales en Contextos ZNI (C y D)	58
Tabla 38. Condiciones mínimas requeridas en el área de acopio para almacenamiento temporal de módulos fotovoltaicos	60
Tabla 39. Diagnóstico de condiciones adversas y medidas correctivas para el área de acopio de módulos fotovoltaicos	61
Tabla 40. Lista de verificación previa al uso del área de acopio para almacenamiento temporal de módulos fotovoltaicos	62
Tabla 41. Requerimientos mínimos de infraestructura para el almacenamiento temporal obligatorio en ZNI	63
Tabla 42. Indicadores cumplimiento fase 2	64
Tabla 43. Criterios de cumplimiento área de pretratamiento fase 3	65
Tabla 44. Instrumentos de medición y verificación eléctrica	69
Tabla 45. Herramientas para desconexión de conectores MC4	70
Tabla 46. Herramientas de corte para conductores DC.....	70
Tabla 47. Herramientas de sujeción, soporte y organización	71
Tabla 48. Elementos de protección personal (EPP) — remoción de cables	71
Tabla 49. Lista de verificación previa al inicio de la remoción	74
Tabla 50. Categorías para la clasificación durante la segregación de materiales.	76

Tabla 51. Indicadores cumplimiento fase 3	77
Tabla 52. Tecnologías utilizadas para la separación de materiales en módulos fotovoltaicos	79
Tabla 53. Método 1 — Desensamble mecánico manual y semiautomático	80
Tabla 54. Método 2 — Tratamiento térmico (pirólisis / combustión controlada)	81
Tabla 55. Método 3 — Procesos químicos / hidrometalúrgicos	81
Tabla 56. Tabla comparativa de los tres métodos	82
Tabla 57. Requisitos normativos para tratamientos térmicos y químicos de residuos fotovoltaicos en Colombia	83
Tabla 58. Factores del contexto colombiano	84
Tabla 59. Ruta de evolución tecnológica recomendada para Colombia	86
Tabla 60. Indicadores cumplimiento fase 4	86
Tabla 61. Diagnóstico de brechas de infraestructura para el tratamiento del laminado fotovoltaico en Colombia (2025)	87
Tabla 62. Composición aproximada del laminado fotovoltaico después de la separación del vidrio	89
Tabla 63. Procedimientos y equipos alternativos según la escala de operación del gestor	90
Tabla 64. Procedimiento manual para reducción de tamaño y separación de fracciones	90
Tabla 65. Herramientas e insumos para el procedimiento manual de pequeña escala	91
Tabla 66. Modelos de alianza industrial para gestores de pequeña y mediana escala	92
Tabla 67. Porcentajes aproximados de recuperación de materiales en el tratamiento del laminado	94
Tabla 68. Reducción de tamaño del laminado	94
Tabla 69. Separación de fracciones metálicas	95
Tabla 70. Lista de verificación previa al inicio del procesamiento del laminado	97
Tabla 71. Lista de verificación previa a la entrega de fracciones para tratamiento térmico o químico	98
Tabla 72. Equipos utilizados en el tratamiento del laminado fotovoltaico	99
Tabla 73. EPP a utilizar en el tratamiento del laminado fotovoltaico	99
Tabla 74. Identificación y control de riesgos en el tratamiento del laminado fotovoltaico	100
Tabla 75. Condiciones requeridas en el área de tratamiento del laminado	100
Tabla 76. Indicadores cumplimiento fase 5	101
Tabla 77. Fracciones de materiales generadas durante el reciclaje de módulos fotovoltaicos	103
Tabla 78. Clasificación y pesaje final de fracciones	103
Tabla 79. Trazabilidad y cierre documental	105
Tabla 80. Elementos de protección personal (EPP) — Fase 6	106
Tabla 81. Identificación y control de riesgos — Fase 6	108
Tabla 82. Condiciones requeridas en el área de valorización y cierre	109
Tabla 83. Tasas de recuperación esperadas y rutas de valorización para cada fracción del módulo fotovoltaico	110
Tabla 84. Rutas de gestión alternativas según disponibilidad de infraestructura en Colombia	112
Tabla 85. Protocolo transitorio paso a paso para gestores sin infraestructura específica en módulos FV	113
Tabla 86. Actores responsables e instrumentos de política para el cierre de brechas de infraestructura FV en Colombia	114
Tabla 87. Agentes institucionales involucrados en la gestión de residuos de paneles solares fotovoltaicos	115
Tabla 88. Principales gestores RAEE autorizados en Colombia	116
Tabla 89. Resumen de materiales y canales de disposición en Colombia	117
Tabla 90. Indicadores cumplimiento fase 6	118



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de gestión de residuos de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino	11
Figura 2. Procedimiento de verificación de ausencia de tensión DC en módulo fotovoltaico mediante multímetro. Las sondas se conectan al cable DC (+) y (-); una lectura de 0 V confirma que es seguro proceder	20
Figura 3. Seccionador DC en posición OFF con candado de bloqueo (lockout/tagout) y etiqueta de señalización instalados. Esta condición es requisito previo para cualquier intervención sobre los módulos fotovoltaicos.	21
Figura 4. Secuencia de aflojamiento cruzado de abrazaderas en el sistema de montaje (racking). El patrón A→C→B→D distribuye las fuerzas uniformemente y evita torsiones en el vidrio frontal.	22
Figura 5. Retiro de abrazaderas del sistema de montaje. A la izquierda, abrazadera en buen estado; a la derecha, abrazadera oxidada con protocolo de lubricación previa.	23
Figura 6. Manipulación segura del módulo fotovoltaico tras su liberación de la estructura. Para módulos superiores a 25 kg la operación requiere dos personas.	24
Figura 7. Orientación y apilamiento de módulos en la zona de acopio. Opción A: horizontal sobre manta protectora con vidrio hacia arriba. Opción B: apilado con separadores de cartón o foam entre módulos.	25
Figura 8. Sistema de identificación y trazabilidad interna del módulo fotovoltaico retirado. El código asignado en la Fase 1 acompaña al módulo en todas las etapas del proceso de gestión de residuos.	26
Figura 9. Doble registro de trazabilidad del módulo fotovoltaico retirado: etiqueta física adherida al módulo o pallet y formulario de retiro diligenciado con el mismo código interno.	27
Figura 10. Componentes y composición material de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino	30
Figura 11. Procedimiento de embalaje en pallet para módulos fotovoltaicos retirados	47
Figura 12. Metodo A - Desconexión manual de conectores MC4 (preferido)	73
Figura 13. Método B — Corte controlado del conductor (cuando el conector no puede separarse manualmente)	73
Figura 14. Estructura de un módulo fotovoltaico con identificación del marco de aluminio.	78
Figura 15. Estructura del laminado fotovoltaico después de la separación del vidrio	89



INTRODUCCIÓN

La presente guía técnica orientadora describe las etapas y criterios técnicos para la gestión sostenible de residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino (c-Si) al final de su vida útil en Colombia, debido a que dicha tecnología representa aproximadamente el 95 % de la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial y constituye la tecnología predominante en los proyectos fotovoltaicos desarrollados en Colombia (por lo que se espera que estos módulos representen la principal fuente de residuos fotovoltaicos industriales generados en el país en las próximas décadas (IEA, 2025, UPME, 2025). El documento está dirigido a instaladores, empresas EPC (Engineering, Procurement and Construction), gestores de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) autorizados y empresas recicladoras que participen en el proceso de retiro, tratamiento y valorización de módulos fotovoltaicos.

La guía se estructura en seis fases secuenciales, las cuales son: (1) Retiro del módulo fotovoltaico y verificación técnica inicial; (2) Manejo logístico del módulo retirado – manipulación, embalaje y transporte; (3) Pretratamiento del módulo fotovoltaico – remoción de cables, conectores y caja de conexiones; (4) Desensamble del módulo fotovoltaico – separación del marco y preparación del módulo para recuperación de materiales; (5) Tratamiento del laminado fotovoltaico – recuperación de materiales presentes en celdas y encapsulante; y (6) Gestión

de fracciones residuales y valorización final – cierre del proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos. Cada una de las fases incluye el objetivo, los procedimientos técnicos, indicadores de cumplimiento verificables y referencias al marco normativo colombiano aplicable, con el propósito de orientar una gestión ambientalmente adecuada y alineada con los principios de economía circular.

Este documento es el producto central del proyecto de investigación desarrollado en la Universidad EAN y ha sido validado mediante evaluación de expertos utilizando el coeficiente V de Aiken. El panel está compuesto por siete (7) evaluadores expertos en los siguientes temas: un experto del ámbito académico e investigativo, cuatro del sector público y dos del sector privado o de gestión, quienes evaluaron la claridad, pertinencia y aplicabilidad técnica de cada fase de la guía.

ALCANCE

La presente guía técnica orientadora tiene como alcance describir las principales etapas técnicas involucradas en la gestión de residuos de paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil, abordando las operaciones que se realizan desde el retiro del módulo del sistema fotovoltaico hasta la valorización final de los materiales recuperados.

Las etapas consideradas dentro del alcance de la guía se presentan en la

Tabla 1.

Tabla 1. Fases consideradas dentro del alcance de la guía técnica orientadora

Fase	Objetivo operativo	Materiales / componentes involucrados	Referencias
1. Retiro del módulo y verificación técnica inicial	Desinstalar el módulo de forma segura y clasificar su estado físico para definir condiciones de manejo	Módulo completo (c-Si), sistema de montaje, conectores	Bošnjaković et al. (2023); Li et al. (2024)
2. Manejo logístico del módulo retirado (manipulación, embalaje y transporte)	Preservar la integridad estructural del módulo durante su traslado al punto de tratamiento	Módulo clasificado, materiales de embalaje	Mahmoudi et al. (2021); IEA-PVPS (2021)
3. Pretratamiento del módulo fotovoltaico (remoción de cables, conectores y caja de conexiones)	Retirar los componentes eléctricos externos del módulo como preparación para el desensamble	Cables DC, conectores MC4, junction box, cobre	Das & Sarmah (2025); Gahlot et al. (2022)
4. Desensamble del módulo fotovoltaico (separación del marco y preparación del módulo para recuperación de materiales)	Separar el marco de aluminio y el vidrio frontal para su valorización independiente	Marco de aluminio, vidrio templado, laminado restante	Deng et al. 2022; Lim et al. (2022); Díez-Suárez et al. (2024)
5. Tratamiento del laminado fotovoltaico (recuperación de materiales presentes en celdas y encapsulante)	Liberar y recuperar Silicio, metales conductores y gestionar fracciones poliméricas	Celdas c-Si, EVA, interconectores Cu/Ag, backsheet	Ansaneli et al. (2021); Mao et al. (2024); Dias et al. (2021)
6. Gestión de fracciones residuales y valorización final (cierre del proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos)	Direccionar cada fracción recuperada hacia su ruta de reciclaje, valorización energética o disposición controlada	Aluminio, vidrio, silicio, Cu/Ag, polímeros, residuos finos	Bulińska et al. (2025); Ganesan & Valderrama (2022); Kabir et al. (2023)

Nota. Elaboración propia con base en los procesos de gestión de residuos fotovoltaicos reportados en la literatura científica revisada

La implementación efectiva de la presente guía requiere la participación coordinada de diferentes actores del sistema de gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia. La **Tabla 2** presenta los actores responsables por fase, distinguiendo entre el actor principal quien lidera la ejecución y los actores de apoyo quienes brindan soporte técnico, logístico o de control durante cada etapa del proceso.

Tabla 2. Actores responsables por fase en el proceso de gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia

Fase	Actor principal	Actores de apoyo	Responsabilidad específica
1. Retiro del módulo y verificación técnica inicial	Instalador / empresa EPC — o — Operador AOM (en proyectos ZNI o con contrato O&M vigente)	Propietario del sistema / entidad pública financiadora (IPSE, FNCE)	Ejecutar el retiro seguro del módulo, clasificarlo (A/B/C) y registrar su trazabilidad interna. En proyectos ZNI: el operador AOM asume esta responsabilidad en nombre de la

Fase	Actor principal	Actores de apoyo	Responsabilidad específica
			entidad pública propietaria de la infraestructura.
2. Manejo logístico del módulo retirado (manipulación, embalaje y transporte)	Instalador / empresa EPC — o — Operador AOM (en proyectos ZNI o con contrato O&M vigente)	Transportador autorizado / Gestor RAEE receptor	Emballar, asegurar y transportar los módulos retirados hasta el punto de tratamiento. En proyectos ZNI: el operador AOM coordina la logística desde la comunidad hasta el centro de acopio regional más próximo, en cumplimiento de su contrato con la entidad financiadora.
3. Pretratamiento del módulo fotovoltaico	Gestor autorizado RAEE	Instalador / empresa EPC / operador AOM	Retirar cables, conectores y caja de conexiones; segregar materiales según su composición.
4. Desensamble del módulo fotovoltaico	Gestor autorizado RAEE	Empresa recicladora especializada	Separar el marco de aluminio y el vidrio frontal para su valorización independiente.
5. Tratamiento del laminado fotovoltaico	Empresa recicladora especializada	Gestor RAEE autorizado	Triturar el laminado, recuperar metales conductores y silicio, gestionar fracciones poliméricas.
6. Gestión de fracciones residuales y valorización final	Empresa recicladora especializada	Autoridad ambiental (CAR / ANLA)	Direccionar materiales recuperados hacia sus rutas de valorización y registrar trazabilidad ante la autoridad competente.

Nota. Elaboración propia con base en el Decreto 284 de 2018, la Política Nacional RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y Kabir et al. (2023)

La distribución de responsabilidades presentada refleja tres aspectos clave del contexto colombiano. En primer lugar, el instalador o empresa EPC asume la responsabilidad operativa durante las Fases 1 y 2, en coherencia con el principio de responsabilidad extendida del productor establecido en el Decreto 284 de 2018, según el cual quien comercializa e instala equipos eléctricos y electrónicos debe garantizar su adecuada gestión al final de la vida útil. En segundo lugar, el gestor RAEE autorizado toma el control a partir de la Fase 3, dado que en Colombia estos actores cuentan con la licencia ambiental requerida para la manipulación, tratamiento y disposición de residuos con características de peligrosidad. Finalmente, la autoridad ambiental — representada por las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) o la ANLA según corresponda — cumple un rol de control y verificación en la Fase 6, sin intervención operativa directa en las etapas anteriores, lo cual es coherente

con el esquema de supervisión ambiental vigente en el país (Kabir et al., 2023).

La distribución de responsabilidades presentada incorpora un cuarto aspecto específico del contexto colombiano que la versión anterior no abordaba: el rol de los operadores de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) en las Zonas No Interconectadas. En Colombia, aproximadamente el 52 % de los municipios corresponden a ZNI, donde la energía eléctrica no llega a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y donde los proyectos fotovoltaicos de uso comunitario o municipal son financiados mayoritariamente con recursos públicos del IPSE o del FNCE (UPME, 2025; Ley 2099 de 2021). En estos territorios, la infraestructura fotovoltaica es propiedad del Estado y su operación se entrega a un operador AOM bajo contrato, con el propósito de garantizar la prestación continua del servicio y la sostenibilidad técnica del proyecto.



El operador AOM, en virtud de su contrato y de su presencia permanente en el territorio, es el actor con la capacidad operativa real para ejecutar los protocolos de retiro y verificación de la Fase 1 y los procedimientos de embalaje y logística de la Fase 2. Por tanto, esta guía establece que las obligaciones de gestión de residuos fotovoltaicos descritas en las Fases 1 y 2 son parte integrante de las obligaciones contractuales del operador AOM, en coherencia con el principio de responsabilidad extendida del productor del Decreto 284 de 2018 y con las obligaciones de transición energética sostenible de la Ley 2099 de 2021. La entidad pública financiadora (IPSE, municipio o FNCE) es solidariamente responsable de garantizar que el contrato de AOM incluya explícitamente estas obligaciones antes de la firma.

La presente guía tiene vocación de aplicación nacional y reconoce explícitamente la diversidad de contextos logísticos del territorio colombiano. Sus lineamientos de transporte se han diferenciado en cuatro contextos de acceso (A, B, C y D, descritos en la sección 2.5.B de la Fase 2), que van desde vías primarias pavimentadas hasta el acceso exclusivamente fluvial o aéreo propio de comunidades ZNI. La guía no limita su alcance a proyectos con acceso terrestre optimizado; por el contrario, establece protocolos específicos para cada contexto, reconociendo que la ausencia de alternativas de transporte adaptadas a territorios de difícil acceso constituye el principal riesgo de abandono de módulos al final de su vida útil en zonas rurales dispersas.

La presente guía reconoce que la disponibilidad de gestores RAEE con capacidad operativa específica para el tratamiento de módulos fotovoltaicos en Colombia es actualmente limitada. La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible, 2015) identifica explícitamente la necesidad de ampliar la cobertura territorial y la capacidad técnica de los gestores RAEE autorizados como condición para consolidar un sistema funcional de gestión posconsumo. En este contexto, la guía adopta un enfoque de implementación progresiva que contempla rutas de gestión transitorias para aquellos escenarios en que no exista un gestor receptor con infraestructura específica para módulos FV en el área de influencia del generador.

Las rutas transitorias descritas en la Fase 6 de esta guía no sustituyen la obligación normativa de gestionar los residuos con gestores debidamente autorizados, sino que orientan la mejor decisión técnica y ambientalmente responsable dentro del marco regulatorio vigente, mientras el sistema de gestión RAEE colombiano amplía su capacidad para atender específicamente los residuos fotovoltaicos (Ganesan & Valderrama, 2022; Das & Sarmah, 2025).

La guía adopta el marco de la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MADS/MinCIT, 2019) como referente estratégico para orientar la transición del sistema de gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia. La ENEC identifica los flujos de materiales (Eje 2), los nuevos modelos de negocio circulares (Eje 5) y la producción y consumo sostenibles (Eje 1) como ejes prioritarios de intervención; el reciclaje de módulos fotovoltaicos contribuye directamente a los tres ejes al recuperar materiales estratégicos (aluminio, vidrio, cobre, silicio), habilitar nuevos servicios de gestión posconsumo y reducir la disposición en rellenos sanitarios de residuos con potencial de valorización. En consecuencia, las rutas de gestión y el plan de transición tecnológica descritos en las Fases 4, 5 y



6 de esta guía se formulan en coherencia con los principios y metas de la ENEC.

La

Figura 1 presenta el diagrama de flujo general del proceso de gestión de residuos fotovoltaicos, integrando las seis fases descritas en esta guía desde el retiro del módulo hasta la valorización final de los materiales recuperados.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de gestión de residuos de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino



Nota. Elaboración propia con base en Ansanelli et al. (2021), Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS Y DEFINICIONES

Nota de uso del glosario: Los términos están organizados en cuatro categorías: (A) Componentes del módulo fotovoltaico, (B) Fallas y condiciones técnicas, (C) Procesos y técnicas de reciclaje y (D) Términos normativos, de gestión y siglas. Los términos se presentan en orden alfabético dentro de cada categoría. La columna 'Referencia' indica las fuentes donde puede ampliarse la información.

A. Componentes del módulo fotovoltaico de silicio cristalino

Los componentes descritos a continuación corresponden a las partes constitutivas del módulo fotovoltaico de silicio cristalino que son referenciadas en las distintas fases de esta guía. Para una representación visual integrada de todos los componentes, véase la Figura 10 (página 32 de la guía).

Término / componente	Definición técnica
Backsheet (lámina posterior)	Capa polimétrica multicapa ubicada en la cara posterior del módulo fotovoltaico que actúa como barrera eléctrica y ambiental, protegiéndolo de la humedad, la radiación UV y los agentes atmosféricos. Está compuesta típicamente por fluoropolímeros (PVF o PVDF) o poliésteres. Su integridad es crítica para la seguridad eléctrica del módulo; una perforación eleva la clasificación del módulo a Clase C. Referencia: Li et al. (2024); Bošnjaković et al. (2023)
Cable DC (cable de corriente continua)	Conductor eléctrico aislado que conduce la corriente generada por el módulo fotovoltaico en corriente continua (DC) desde los terminales del módulo hasta la caja combinadora, el inversor o el seccionador. Su aislamiento puede degradarse por exposición prolongada a UV, calor o humedad, generando riesgo eléctrico al momento del retiro. Referencia: IEC 62446-1:2016+A1:2018
Caja de conexiones (junction box)	Componente encapsulado ubicado en la cara posterior del módulo que aloja los diodos de bypass y los terminales de salida de la corriente generada. Está fabricada en material polimérico resistente a la intemperie. Su daño o desprendimiento constituye una señal de alerta que eleva la clasificación del módulo a Clase B o C. Referencia: Bošnjaković et al. (2023); Das & Sarmah (2025)
Celda fotovoltaica (celda solar)	Dispositivo semiconductor de silicio cristalino (monocristalino o policristalino) que convierte la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Las celdas son los componentes activos del módulo y contienen trazas de plomo en las soldaduras de interconexión, lo que determina su clasificación como residuo peligroso (RESPEL) al final de su vida útil. Referencia: Ansanelli et al. (2021); Deng et al. (2022)
Conector MC4	Conector eléctrico de tipo macho/hembra estándar en la industria fotovoltaica, diseñado para la conexión en serie o paralelo de módulos. Resiste hasta 1 000 V DC y condiciones de intemperie. Su nombre proviene del fabricante Multi-Contact y la dimensión de 4 mm del contacto. Requiere herramienta especial (MC4 unlocking tool) para su desconexión sin daño. Referencia: IEC 62446-1:2016+A1:2018; Fase 3 de la guía
Encapsulante EVA (etileno-vinil-acetato)	Polímero transparente que rodea y adhiere las celdas fotovoltaicas entre el vidrio frontal y el backsheet, protegiéndolas mecánicamente y eléctricamente. Puede degradarse por exposición a UV y calor, generando burbujas, opacidad o delaminación. Es uno de los componentes más difíciles de separar durante el reciclaje por su alta adhesión con el vidrio y las celdas.

Término / componente	Definición técnica
	Referencia: Dias et al. (2021); Mao et al. (2024)
Interconector (interconexión metálica)	Tira metálica de cobre estañado que conecta eléctricamente las celdas solares en serie dentro del laminado fotovoltaico. Constituye la principal fuente de cobre recuperable del módulo (aproximadamente 1–2 % del peso total). Se separa del laminado durante el tratamiento mecánico mediante separación magnética e imanes de mano. Referencia: Gahlot et al. (2022); Deng et al. (2022)
Laminado fotovoltaico	Conjunto de capas que resulta tras la separación del marco de aluminio y el vidrio frontal durante la Fase 4. Contiene las celdas de silicio, el encapsulante EVA, los interconectores de cobre y el backsheet. Es el objeto de tratamiento en la Fase 5 de la guía. Referencia: Ansanelli et al. (2021); Fase 5 de la guía
Marco de aluminio	Perfil estructural de aluminio extruido que enmarca y protege el laminado fotovoltaico. Constituye entre el 7 y el 10 % del peso total del módulo. Es el componente de mayor valor y mayor facilidad de recuperación, con tasas de reciclaje de hasta el 98 % mediante fundición industrial convencional. Referencia: Bulińska et al. (2025); Deng et al. (2022)
Módulo fotovoltaico (panel solar FV)	Unidad ensamblada lista para instalación que integra celdas fotovoltaicas de silicio cristalino, encapsulante EVA, vidrio frontal, backsheet, marco de aluminio y caja de conexiones. Es la unidad básica de los sistemas fotovoltaicos y el objeto central de gestión en esta guía al final de su vida útil. Referencia: IEA-PVPS (2021); Bošnjaković et al. (2023)
Sistema fotovoltaico (arreglo FV)	Conjunto de módulos fotovoltaicos interconectados eléctricamente con sus componentes de balance de sistema (BOS): inversor, seccionadores, cajas combinadoras, cableado y estructura de soporte. Un arreglo FV puede generar tensiones DC superiores a 600 V incluso con el inversor apagado, lo que exige verificación de ausencia de tensión antes de cualquier intervención. Referencia: IEC 62446-1:2016+A1:2018
Vidrio frontal (vidrio templado)	Lámina de vidrio templado de bajo contenido en hierro ubicada en la cara frontal del módulo, que permite el paso de la luz solar a las celdas. Tiene un espesor típico de 3–4 mm y representa entre el 65 y el 75 % del peso total del módulo. Es la fracción de mayor peso recuperable; su separación sin fractura facilita su valorización como materia prima secundaria en la industria vidriera. Referencia: IEA-PVPS (2021); Lim et al. (2022)

Nota. Definiciones elaboradas con base en la literatura científica y técnica de referencia de la guía.

B. Fallas, condiciones técnicas y clasificación operativa

Los siguientes términos describen las condiciones físicas y funcionales que determinan la clasificación operativa de los módulos (Clase A, B o C) y el protocolo de manejo aplicable en cada fase.

Término / componente	Definición técnica
Clase A / B / C (clasificación operativa)	Sistema de clasificación interna del módulo fotovoltaico establecido en la Fase 1 de esta guía con base en su estado físico tras la inspección visual. Clase A: integridad alta, sin daños visibles. Clase B: integridad media, daños parciales (delaminación, marco

Término / componente	Definición técnica
	deformado, junction box dañada). Clase C: integridad baja, vidrio fracturado o backsheet perforado. Determina el nivel de embalaje, las precauciones de transporte y el protocolo de pretratamiento. Referencia: Bošnjaković et al. (2023); Li et al. (2024)
Delaminación	Separación parcial o total entre las capas del laminado fotovoltaico (vidrio–EVA–celdas–backsheet) causada por degradación del encapsulante EVA o por ingreso de humedad. Se manifiesta como burbujas, zonas opacas o amarillentas y manchas de condensación interna. Eleva la clasificación del módulo a Clase B (parcial) o C (severa con ingreso de humedad). Referencia: Li et al. (2024); Dias et al. (2021)
Hot spot (punto caliente)	Falla térmica localizada en una celda o grupo de celdas fotovoltaicas producida por sombra parcial, defecto de fabricación o daño progresivo. Se manifiesta como una zona de mayor temperatura que el resto del módulo, observable en termografía infrarroja y en algunos casos a simple vista como decoloración marrón o ampollas en el backsheet. Puede derivar en perforación del backsheet (Clase C). Referencia: Bošnjaković et al. (2023); Gahlot et al. (2022)
Lockout/tagout (bloqueo y etiquetado)	Procedimiento de seguridad industrial que consiste en bloquear físicamente (mediante candado) y señalizar (mediante etiqueta) un equipo o sistema en posición de aislamiento seguro, impidiendo su reconexión accidental durante las labores de mantenimiento o retiro. En el contexto fotovoltaico se aplica al seccionador DC antes de cualquier intervención sobre el módulo. Referencia: Resolución 2400 de 1979; ISO 45001:2018
Microfisura (crack)	Fractura microscópica en las celdas fotovoltaicas, generalmente no visible a simple vista, producida por impactos mecánicos, vibraciones, granizo o mala manipulación. Reduce la potencia del módulo y puede propagarse hasta generar fracturas visibles bajo esfuerzo mecánico. Su diagnóstico preciso requiere equipo de electroluminiscencia (EL). Referencia: Bošnjaković et al. (2023); Li et al. (2024)
PID (degradación inducida por potencial) Potential-Induced Degradation	Falla eléctrica interna de los módulos fotovoltaicos producida por corrientes de fuga entre las celdas, el marco y la estructura de soporte a través del encapsulante, inducidas por el alto potencial eléctrico del arreglo. No genera daños físicos visibles, pero produce pérdidas de potencia superiores al 20 %. Frecuente en sistemas de alta tensión DC y en instalaciones en zonas costeras o de alta humedad. Referencia: Bošnjaković et al. (2023)
Tensión en circuito abierto (Voc)	Tensión máxima que genera un módulo fotovoltaico en condiciones de iluminación sin carga conectada. En módulos de silicio cristalino estándar oscila entre 30 y 50 V por módulo; en arreglos en serie puede alcanzar 600–1 500 V DC. Un módulo expuesto a luz solar genera Voc incluso con el inversor desconectado, lo que exige verificación con multímetro antes del retiro. Referencia: IEC 62446-1:2016+A1:2018

Nota. Definiciones elaboradas con base en la literatura científica y técnica de referencia de la guía.

C. Procesos y técnicas de tratamiento y reciclaje

Los siguientes términos describen los procesos y técnicas utilizados en las Fases 3 a 6 de la guía para el pretratamiento, desensamble, tratamiento del laminado y valorización de materiales.

Término / componente	Definición técnica
Co-procesamiento	Técnica de valorización energética que consiste en la destrucción o aprovechamiento de residuos como sustituto parcial de combustible o materia prima en hornos industriales de alta temperatura (principalmente hornos cementeros). Aplicable a las fracciones poliméricas del módulo FV (EVA, backsheet). Requiere licencia ambiental del horno receptor y cumplimiento de la Resolución 909 de 2008. Referencia: Das & Sarmah (2025); Resolución 909 de 2008
Corrientes de Foucault (eddy currents)	Fenómeno electromagnético explotado en los separadores industriales para recuperar metales no ferrosos (aluminio, cobre) de una mezcla de materiales. Un rotor giratorio genera un campo magnético variable que induce corrientes en los metales conductores no magnéticos, desviando su trayectoria y separándolos del material no metálico. No disponible en la mayoría de gestores RAEE colombianos actuales (ver sección 5.3 de la guía). Referencia: Gahlot et al. (2022); Lim et al. (2022)
Desensamble	Conjunto de operaciones que permite separar el módulo fotovoltaico en sus componentes principales: marco de aluminio, vidrio frontal y laminado. Corresponde a la Fase 4 de la guía y constituye el paso previo al tratamiento del laminado. Referencia: Deng et al. (2022); Díez-Suarez et al. (2024)
Flotación / separación densimétrica	Técnica de separación de materiales basada en la diferencia de densidad entre las fracciones. En el reciclaje de módulos FV se emplea para separar silicio (densidad ~2,33 g/cm³) de los polímeros EVA y backsheet (densidad < 1,3 g/cm³) sumergiéndolos en agua. Alternativa de bajo costo a la mesa densimétrica industrial para gestores de pequeña escala. Referencia: Ansanelli et al. (2021); Días et al. (2021)
Hidrometalurgia	Conjunto de procesos químicos en fase acuosa (ácidos, bases, agentes lixiviantes) utilizados para disolver y recuperar metales de alta pureza (silicio > 99 %, plata) del laminado fotovoltaico. Permite tasas de recuperación superiores a las técnicas mecánicas, pero requiere infraestructura especializada, licencia ambiental y gestión de efluentes conforme a la Resolución 631 de 2015. Referencia: Ansanelli et al. (2021); Mao et al. (2024)
Pirólisis	Proceso termoquímico de descomposición del encapsulante EVA del módulo fotovoltaico mediante calor (400–600 °C) en atmósfera inerte o con bajo contenido de oxígeno, que libera las celdas de silicio del laminado sin oxidarlas. Genera mayor pureza de silicio recuperado que el método mecánico, pero requiere alto consumo energético, licencia ambiental y cumplimiento de la Resolución 909 de 2008. Referencia: Dias et al. (2021); Ansanelli et al. (2021)
Pretratamiento	Conjunto de operaciones previas al desensamble que consisten en la remoción de los componentes eléctricos externos del módulo (cables DC, conectores MC4 y caja de conexiones). Corresponde a la Fase 3 de la guía y es ejecutado por el gestor RAEE autorizado. Referencia: Das & Sarmah (2025); Gahlot et al. (2022)
Separación magnética	Técnica de separación que emplea imanes permanentes o electromagnéticos para recuperar materiales ferrosos de una mezcla heterogénea. En el reciclaje de módulos FV se aplica sobre el material triturado para recuperar los interconectores de cobre y otros fragmentos metálicos. Implementable a pequeña escala con imanes de mano (ferrita o neodimio) o a escala industrial con cintas magnéticas y tambores magnéticos. Referencia: Gahlot et al. (2022); Deng et al. (2022)
Trazabilidad	Sistema de registro continuo que permite identificar el origen, el estado físico, el responsable, el destino y el historial de gestión de cada módulo fotovoltaico a lo largo

Término / componente	Definición técnica
	de todas las fases del proceso. En Colombia, la trazabilidad de residuos peligrosos (RESPEL) es obligatoria conforme al Decreto 4741 de 2005 y la Ley 1672 de 2013. Referencia: Decreto 4741 de 2005; Ley 1672 de 2013
Valorización	Conjunto de operaciones mediante las cuales los materiales recuperados del módulo fotovoltaico regresan a los flujos productivos, ya sea como materia prima secundaria (reciclaje material) o como fuente de energía (valorización energética). Es el objetivo final de la Fase 6 de la guía y el indicador principal del cumplimiento de los principios de economía circular. Referencia: Ley 2099 de 2021; Ganesan & Valderrama (2022)

Nota. Definiciones elaboradas con base en la literatura científica y técnica de referencia de la guía.

D. Términos normativos, de gestión y siglas

Los siguientes términos corresponden al marco normativo colombiano, a los actores institucionales y a las siglas empleadas en la guía. Se presentan en orden alfabético por sigla o término.

Término / componente	Definición técnica
ANLA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales	Entidad adscrita al MADS responsable de otorgar, modificar, suspender y revocar las licencias, permisos y trámites ambientales de proyectos de alto impacto en Colombia. En el contexto de esta guía, es la autoridad competente para licencias ambientales de plantas de incineración, hidrometalurgia y tratamiento térmico de RESPEL. Referencia: Decreto 3573 de 2011
AOM Administración, Operación y Mantenimiento	Modalidad contractual en la que una empresa o entidad asume la administración, la operación y el mantenimiento de un sistema fotovoltaico por cuenta del propietario, generalmente bajo un contrato de prestación de servicios con duración de 10 a 20 años. En proyectos ZNI financiados con recursos públicos, el operador AOM es el actor con presencia permanente en el territorio y, por tanto, el responsable operativo de las Fases 1 y 2 de esta guía al final de la vida útil de los módulos. Referencia: Ley 1715 de 2014; Ley 2099 de 2021; Decreto 284 de 2018.
CAR Corporación Autónoma Regional	Entidad pública encargada de administrar, dentro de su área de jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables. Ejerce funciones de control y vigilancia ambiental a escala regional. En el contexto de esta guía, es la autoridad competente para el control del almacenamiento de RESPEL y los vertimientos de pequeña y mediana escala. Referencia: Ley 99 de 1993
Economía circular	Modelo económico que busca mantener el valor de los productos y materiales en el mayor nivel posible, durante el mayor tiempo posible, generando residuos y contaminación mínimos. En el contexto de los residuos FV, implica maximizar la recuperación de aluminio, vidrio, cobre y silicio para su reincorporación a los ciclos industriales, en línea con la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019). Referencia: ENEC (MADS/MinCIT, 2019); Ley 2099 de 2021
EPP Elementos de Protección Personal	Equipos y prendas destinados a proteger al trabajador de los riesgos físicos, químicos y mecánicos presentes durante las operaciones de gestión de módulos fotovoltaicos.

Término / componente	Definición técnica
	Su uso es obligatorio en todas las fases de la guía. Los EPP requeridos varían según la fase y la clasificación del módulo (A, B o C). Referencia: ISO 45001:2018; Resolución 2400 de 1979
EPC Engineering, Procurement and Construction	Modalidad contractual en la que una empresa asume la responsabilidad integral del diseño de ingeniería, la adquisición de equipos y la construcción de un proyecto fotovoltaico. Las empresas EPC son el actor principal en las Fases 1 y 2 de esta guía, según la distribución de responsabilidades del Decreto 284 de 2018. Referencia: Decreto 284 de 2018
Gestor RAEE	Persona natural o jurídica que realiza actividades de recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento, aprovechamiento o disposición final de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), con licencia ambiental vigente otorgada por la autoridad ambiental competente. En Colombia se registra en el SIUR del MADS conforme al Decreto 284 de 2018. Referencia: Decreto 284 de 2018; Ley 1672 de 2013
IPSE Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas	Entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía de Colombia encargada de promover, financiar e implementar proyectos de energización en las Zonas No Interconectadas (ZNI). Es el principal financiador de proyectos fotovoltaicos comunitarios en territorios apartados. En el contexto de esta guía, es la entidad pública propietaria de la infraestructura FV que debe garantizar que los contratos de AOM incluyan las obligaciones de gestión de residuos al final de la vida útil. Referencia: Ley 1099 de 2006; Ley 2099 de 2021.
MADS Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Entidad del Gobierno Nacional responsable de la política ambiental de Colombia. En el contexto de esta guía es la autoridad rectora en materia de gestión de RAEE, residuos peligrosos (RESPEL) y economía circular. Administra el SIUR. Referencia: Ley 99 de 1993
RAEE Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos	Categoría de residuos que incluye los aparatos eléctricos o electrónicos desechados al final de su vida útil. En Colombia son regulados por la Ley 1672 de 2013 y el Decreto 284 de 2018. Los módulos fotovoltaicos se gestionan bajo esta categoría por su componente electrónico (celdas de silicio), aunque sus características físicas y materiales son distintas a los RAEE convencionales. Referencia: Ley 1672 de 2013; Decreto 284 de 2018
RESPEL Residuo o desecho peligroso	Residuo con características de peligrosidad (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o patogenicidad) que requiere manejo especial. En el contexto de esta guía, los fragmentos de celdas fotovoltaicas con trazas de plomo en soldaduras y los polvos de trituración del laminado se clasifican como RESPEL conforme al Decreto 4741 de 2005. Referencia: Decreto 4741 de 2005
Responsabilidad extendida del productor REP	Principio de política ambiental que atribuye al productor o importador de un producto la responsabilidad de gestionar los residuos que genera al final de su vida útil. En Colombia se aplica a los RAEE mediante el Decreto 284 de 2018, que obliga a las empresas que comercializan e instalan equipos eléctricos y electrónicos a garantizar su adecuada gestión posconsumo. Referencia: Decreto 284 de 2018; Ley 1672 de 2013
SIUR Sistema Único de Información de Residuos	Plataforma del MADS que centraliza la información sobre la generación, el manejo y el destino de los residuos especiales y peligrosos en Colombia, incluyendo los RAEE. Los gestores RAEE y los generadores de RESPEL están obligados a reportar en el SIUR según la Ley 1672 de 2013 y el Decreto 4741 de 2005.

Término / componente	Definición técnica
	Referencia: Ley 1672 de 2013; Decreto 4741 de 2005
c-Si Silicio cristalino (crystalline silicon)	Material semiconductor utilizado como base de las celdas fotovoltaicas que constituyen la tecnología predominante a nivel mundial (~95 % de la capacidad instalada). Incluye el silicio monocristalino (mono-Si) y el policristalino (poly-Si). Al final de la vida útil del módulo, los fragmentos de silicio contienen trazas de plomo en las soldaduras y se clasifican como RESPEL. Referencia: IEA-PVPS (2021); Ansanelli et al. (2021)
ZNI Zonas No Interconectadas	Territorios colombianos que no están conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de energía eléctrica. Corresponden aproximadamente al 52 % de los municipios del país, ubicados principalmente en la región Amazónica, Pacífica, Orinoquía y zonas insulares. Los sistemas fotovoltaicos son la solución de electrificación más implementada en las ZNI. Son especialmente relevantes para esta guía porque la mayoría de sus sistemas FV están financiados con recursos públicos y operados bajo contratos de AOM. Referencia: Ley 1715 de 2014; Ley 2099 de 2021; UPME (2025).

Nota. Definiciones normativas elaboradas con base en la legislación colombiana vigente citada en la guía. Las siglas se desarrollan en la segunda columna cuando su nombre completo es distinto al término de búsqueda.

FASE 1. RETIRO DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO Y VERIFICACIÓN TÉCNICA INICIAL

1. Objetivo de la fase

La fase de retiro del módulo fotovoltaico y verificación técnica inicial abarca el

conjunto de operaciones orientadas a desinstalar de forma segura y controlada los módulos del sistema fotovoltaico, preservar su integridad estructural durante el proceso de desmontaje y establecer el estado físico y funcional de cada unidad retirada como insumo para las fases de manejo logístico,

pretratamiento y valorización que le siguen.

El objetivo principal de esta fase es garantizar que el módulo llegue a la siguiente etapa de la cadena de gestión en las mejores condiciones posibles, maximizando así el potencial de recuperación de materiales y minimizando los riesgos de seguridad derivados de una manipulación inadecuada. Un retiro técnicamente correcto reduce la probabilidad de fractura del vidrio frontal, deformación del marco y daños en los conectores, que de ocurrir dificultarían los procesos posteriores de desensamble y reciclaje (Bošnjaković et al., 2023; Li et al., 2024). Adicionalmente, esta fase establece la clasificación operativa del módulo (Clase A, B o C) con base en la inspección visual de su condición física y las señales de falla funcional observable. Dicha clasificación es el criterio determinante para definir el nivel de protección requerido en el embalaje, las precauciones de transporte y el protocolo de pretratamiento aplicable en la Fase 3.

En proyectos fotovoltaicos localizados en Zonas No Interconectadas (ZNI) o en sistemas operados bajo contrato de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM), el operador AOM es el responsable operativo de ejecutar los procedimientos de esta fase. Dado que en estos contextos el sistema suele ser propiedad de una entidad pública (IPSE, municipio o comunidad organizada), el operador AOM actúa en nombre del propietario y debe reportar los resultados de la inspección y la clasificación del módulo tanto a la entidad propietaria como al gestor RAEE receptor. El formulario de retiro de la Fase 1 debe incluir el nombre del operador AOM, el código del proyecto y el nombre de la entidad pública propietaria del sistema.

2. Condiciones de inicio y seguridad previa al retiro

El retiro de módulos fotovoltaicos debe planificarse como una actividad técnica controlada debido a que la manipulación inadecuada incrementa el riesgo de fractura del vidrio, daño interno de celdas y pérdida de materiales recuperables (Bošnjaković et al., 2023); previo a intervenir el sistema se debe asegurar el aislamiento eléctrico del arreglo fotovoltaico aplicando procedimientos de desconexión y verificación de ausencia de tensión de acuerdo con el diseño del sistema (corriente continua y alterna) y con los manuales de operación del equipo asociado (inversor, seccionadores, cajas combinadoras). Con el propósito de reducir riesgos eléctricos y mecánicos, se recomiendan seguir las siguientes recomendaciones:

- Delimitar el área de trabajo y restringir el acceso.
- Utilizar elementos de protección personal (guantes de protección mecánica, gafas, calzado de seguridad y casco cuando aplique).
- Emplear herramientas en buen estado y con calibración vigente cuando corresponda.
- Preparar superficies de apoyo limpias, planas y libres de elementos punzantes.

Criterio operativo clave: el objetivo principal del retiro no es “arrancar” el panel, sino preservar su integridad física en pro de facilitar las etapas posteriores de desensamble y asegurar la separación de materiales.

3. Identificación del escenario de retiro

Es importante tener en cuenta que el retiro del módulo puede originarse por cualquiera de los siguientes escenarios operativos:

- Fin de vida útil: se presenta cuando se tiene un retiro planificado tras la pérdida de desempeño (degradación acumulada).
- Falla o daño prematuro: corresponde al retiro por defectos eléctricos o físicos (fractura, delaminación, hot spots, PID, etc.), los cuales inciden en el correcto desempeño del equipo.
- Repotenciación del sistema: es el retiro por sustitución tecnológica o aumento de la capacidad del sistema.

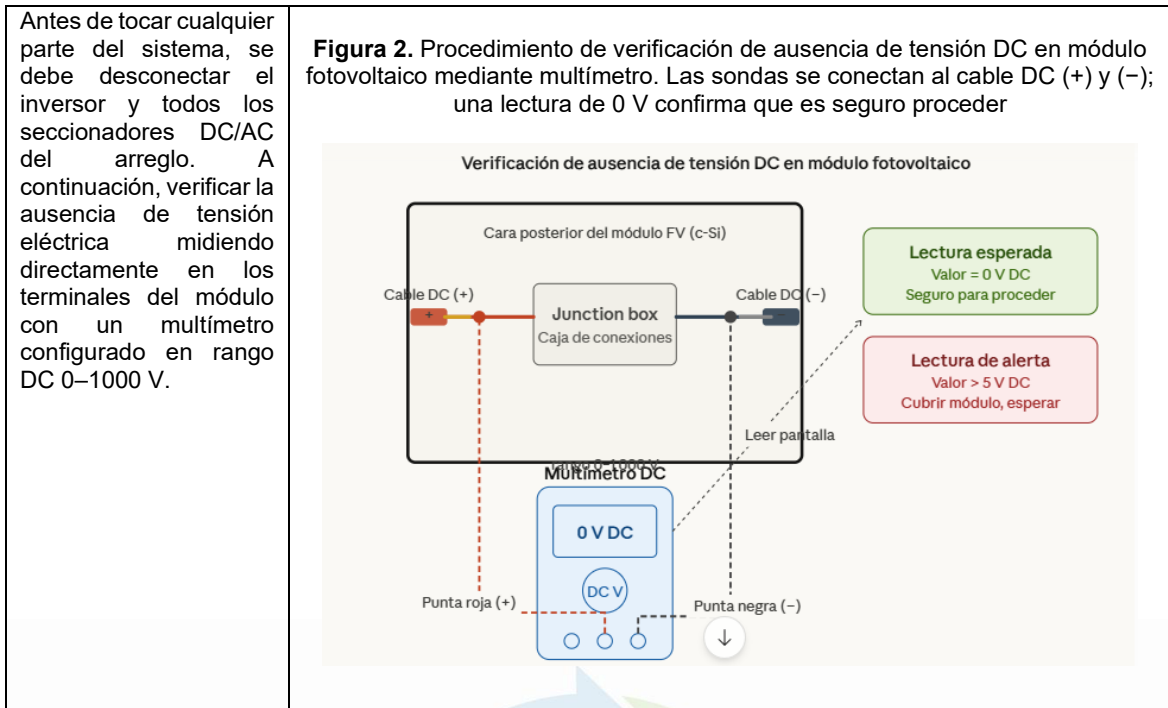
Nota operativa: A pesar de que el escenario cambia la probabilidad de daño previo, el procedimiento de retiro debe mantener el mismo estándar de cuidado para evitar fracturas y dispersión de fragmentos, los cuales puedan comprometer la correcta disposición.

4. Procedimiento técnico de retiro del módulo

Una vez sea definido el retiro de los paneles solares, es importante seguir el procedimiento que se describe a continuación:

4.1. Confirmar aislamiento eléctrico del sistema según el esquema del arreglo:

Tabla 3. Procedimiento de verificación de ausencia de tensión DC en módulo fotovoltaico mediante multímetro.



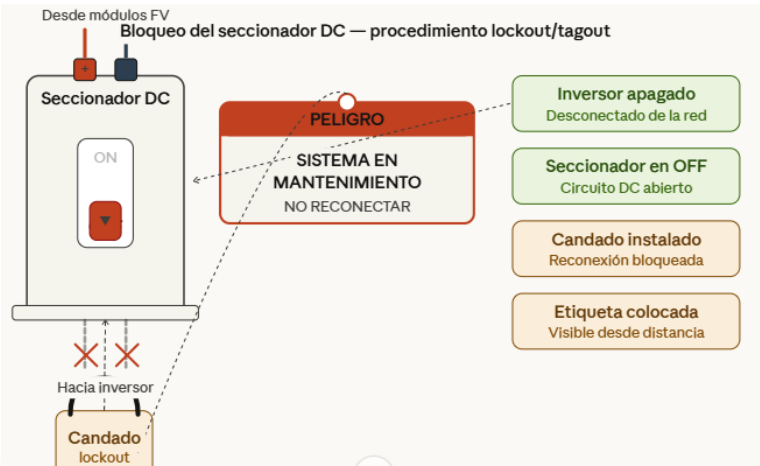
Nota. Elaboración propia con base en IEC 62446-1:2016 y Bošnjaković et al. (2023).

Pasos específicos:

1. Desconectar el inversor y confirmar que la pantalla indica estado apagado.
2. Abrir todos los seccionadores DC del arreglo (string combiner o caja de protección).
3. Configurar el multímetro en modo tensión DC, escala 0–1000 V.
4. Colocar punta roja en terminal (+) y punta negra en terminal (-) del cable de salida del módulo.

5. Confirmar lectura de 0 V (o < 5 V). Si la lectura es mayor, cubrir el módulo con lona opaca 5 min y repetir.
6. Registrar el valor medido en el formulario de retiro.

Tabla 4. Seccionador DC en posición OFF con candado de bloqueo (lockout/tagout) y etiqueta de señalización instalados

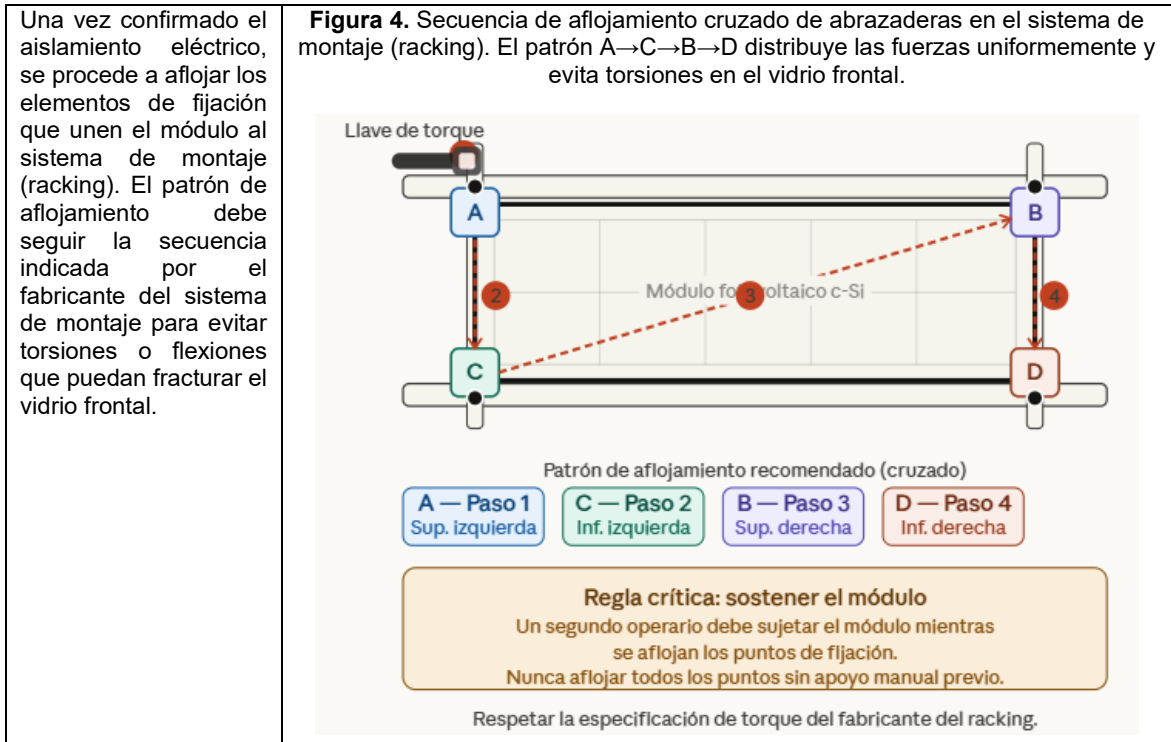
El seccionador DC debe quedar en posición ABIERTO y bloqueado con candado de bloqueo (lockout/tagout) si está disponible. Colgar etiqueta: "SISTEMA EN MANTENIMIENTO – NO RECONECTAR".	Figura 3. Seccionador DC en posición OFF con candado de bloqueo (lockout/tagout) y etiqueta de señalización instalados. Esta condición es requisito previo para cualquier intervención sobre los módulos fotovoltaicos.  Desde módulos FV Bloqueo del seccionador DC — procedimiento lockout/tagout Seccionador DC ON PELIGRO SISTEMA EN MANTENIMIENTO NO RECONECTAR Inversor apagado Desconectado de la red Seccionador en OFF Circuito DC abierto Candado instalado Reconexión bloqueada Etiqueta colocada Visible desde distancia Hacia inversor Candado lockout
⚠ Advertencia: Un módulo expuesto a luz solar directa puede generar hasta 600 V DC incluso con el inversor apagado. La verificación con multímetro es OBLIGATORIA en cada módulo, sin excepción.	

Nota. Elaboración propia con base en IEC 62446-1:2016 y Bošnjaković et al. (2023).



4.2. Liberación mecánica del módulo (estructura de soporte):

Tabla 5. Secuencia de aflojamiento cruzado de abrazaderas en el sistema de montaje (racking)

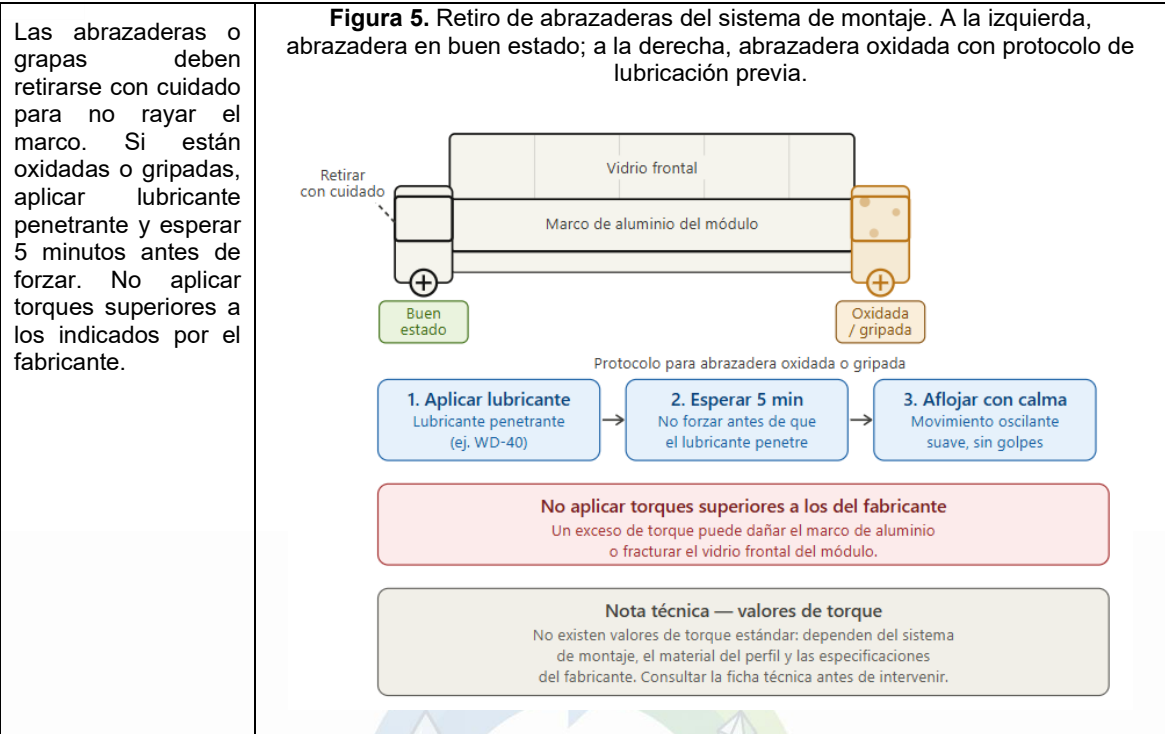


Nota. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023) y las especificaciones técnicas del fabricante del sistema de montaje.

Pasos específicos:

1. Identificar el tipo de sistema de montaje: rieles con abrazaderas, grapas intermedias/finales o perfiles especiales del fabricante.
2. Localizar todos los puntos de fijación del módulo antes de aflojar el primero.
3. Aflojar en patrón cruzado (esquina A → esquina C → esquina B → esquina D) para distribuir las fuerzas uniformemente.
4. Mantener al menos un punto de fijación activo mientras otro operario sostiene el módulo.
5. Retirar completamente los tornillos/abrazaderas y depositarlos en recipiente para evitar pérdidas.
6. Aflojar elementos de sujeción siguiendo el patrón recomendado (evitar torsiones).
7. Soportar el módulo durante el aflojamiento para impedir caída o flexión que pueda fracturar el equipo.

Tabla 6. Retiro de abrazaderas del sistema de montaje



Nota técnica: No existen valores de torque 'estándar': dependen del sistema de montaje, material del perfil y especificaciones del fabricante. Consultar siempre la ficha técnica del racking antes de intervenir.

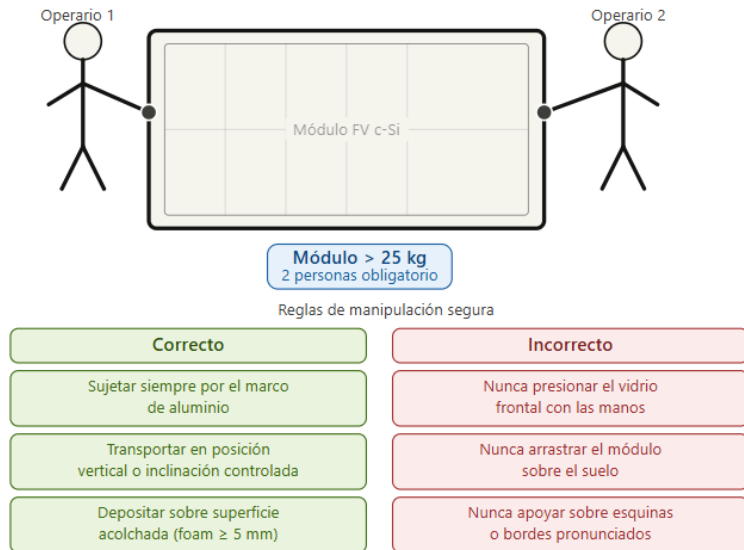
Nota. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023) y las especificaciones del fabricante del racking.

4.3. Manipulación segura del módulo:

Tabla 7. Manipulación segura del módulo fotovoltaico tras su liberación de la estructura

Una vez liberado el módulo de la estructura, debe levantarse y trasladarse hasta la zona de acopio o embalaje siguiendo las reglas de manipulación que evitan daños al vidrio frontal y lesiones al operario. Para módulos de peso > 25 kg se requieren dos personas.	
---	--

Figura 6. Manipulación segura del módulo fotovoltaico tras su liberación de la estructura. Para módulos superiores a 25 kg la operación requiere dos personas.



Nota. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023) y Li et al. (2024).

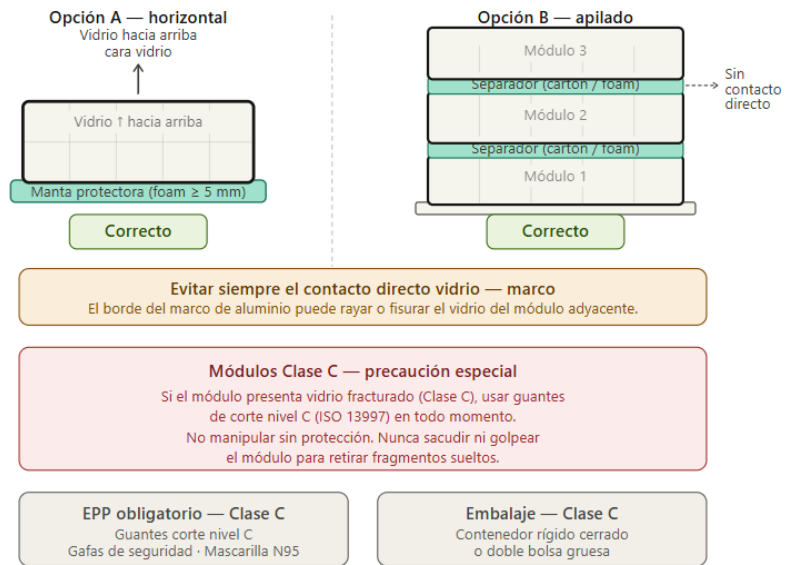
Reglas obligatorias de manipulación:

1. SIEMPRE sujetar el módulo por el marco de aluminio — NUNCA por el vidrio frontal ni por los cables.
2. NUNCA apoyar el módulo sobre sus esquinas: genera esfuerzos puntuales que fracturan el vidrio.
3. NUNCA arrastrar el módulo sobre el suelo ni sobre otras superficies.
4. Trasladar en posición VERTICAL o con inclinación controlada (no horizontal sin soporte).
5. Para módulos > 25 kg: operación SIEMPRE en pareja. Un operario por cada lado largo del módulo.
6. Depositar el módulo sobre superficie acolchada (foam, manta, cartón grueso ≥ 5 mm).

Tabla 8. Orientación y apilamiento de módulos en la zona de acopio

Al colocar el módulo en la zona de acopio, orientarlo de forma que la cara de vidrio quede hacia arriba o apoyada sobre la manta protectora. Si se apilan módulos, colocar separadores entre cada uno para evitar el contacto directo vidrio-marco.	
---	--

Figura 7. Orientación y apilamiento de módulos en la zona de acopio. Opción A: horizontal sobre manta protectora con vidrio hacia arriba. Opción B: apilado con separadores de cartón o foam entre módulos.



⚠ Módulos Clase C — precaución especial: Si el módulo presenta vidrio fracturado (Clase C), usar guantes de corte nivel C en todo momento. No manipular sin protección y nunca sacudir ni golpear para retirar fragmentos sueltos.

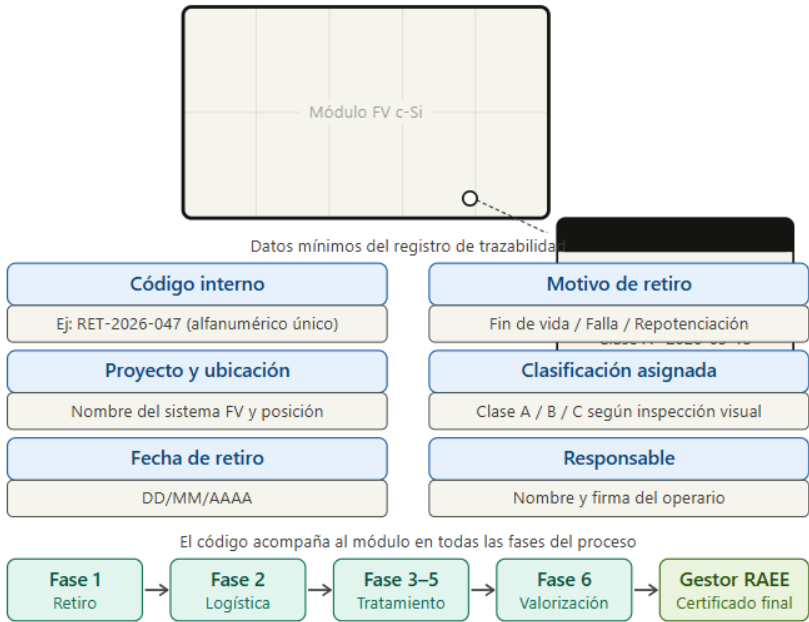
Nota. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023) y Li et al. (2024).

4.4. Registro básico de retiro (trazabilidad interna):

Tabla 9. Sistema de identificación y trazabilidad interna del módulo fotovoltaico retirado

Cada módulo retirado debe quedar identificado con un código interno antes de pasar a la Fase 2. Este registro es la base del sistema de trazabilidad que permite conocer el origen, estado y destino de cada módulo a lo largo de todo el proceso de gestión de residuos.

Figura 8. Sistema de identificación y trazabilidad interna del módulo fotovoltaico retirado. El código asignado en la Fase 1 acompaña al módulo en todas las etapas del proceso de gestión de residuos.



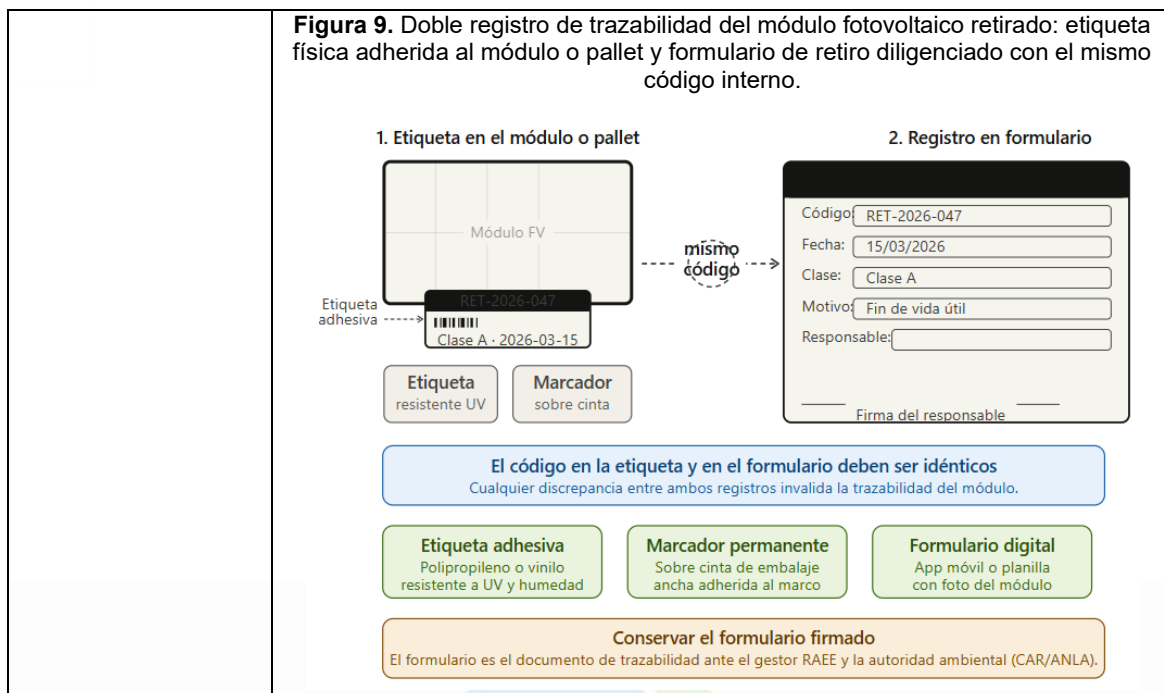
Nota. Elaboración propia con base en IEC 62446-1:2016 y el Decreto 4741 de 2005.

Datos mínimos que debe contener el registro:

1. Código interno de identificación del módulo (alfanumérico, ej: RET-2026-001).
2. Ubicación de origen: nombre del proyecto / dirección / posición en el arreglo.
3. Fecha de retiro.
4. Motivo de retiro: fin de vida útil / falla técnica / repotenciación.
5. Clasificación asignada: Clase A, B o C según inspección visual.
6. Nombre y firma del responsable del retiro.

Tabla 10. Doble registro de trazabilidad del módulo fotovoltaico retirado

El código de identificación debe adherirse físicamente al módulo o al pallet (etiqueta adhesiva resistente a la intemperie o marcador permanente sobre cinta). El mismo código debe registrarse en el formulario de retiro para garantizar la trazabilidad en las fases siguientes.	
--	--



Nota. Elaboración propia con base en IEC 62446-1:2016 y el Decreto 4741 de 2005.

Tabla 11. Modelo de registro de retiro (para diligenciar en campo)

Campo	Descripción	Valor registrado
Código interno	Asignar correlativo único	RET-____-____
Proyecto / Ubic.	Nombre del sistema fotovoltaico y ubicación	_____
Fecha retiro	DD/MM/AAAA	___/___/____
Motivo de retiro	Fin de vida útil / Falla / Repotenciación	☐ FV ☐ FA ☐ RP
Clasificación	Estado físico observado en inspección visual	☐ A ☐ B ☐ C
Potencia nominal	Según placa del módulo (Wp)	_____ Wp
Fabricante / Modelo	Datos de placa de características del módulo	_____
Responsable	Nombre completo	_____
Firma	Confirma que los datos son correctos	_____

Nota. Formato de referencia para trazabilidad interna. Puede adaptarse al sistema de gestión de la empresa.

4.5. Equipos e instrumentos requeridos para el retiro del módulo

Antes de iniciar el retiro del módulo fotovoltaico, el operario responsable debe verificar la disponibilidad y buen estado de los equipos, herramientas y elementos de protección personal (EPP) listados en las siguientes tablas. La verificación debe realizarse en campo, antes de subir a la cubierta o intervenir el sistema. Los elementos están organizados en dos grupos: (a) herramientas e instrumentos de trabajo, y (b) elementos de protección personal (EPP).

⚠ Criterio de suspensión: La ausencia de cualquier elemento clasificado como OBLIGATORIO es criterio suficiente para suspender la actividad hasta garantizar su disponibilidad. No se debe iniciar el retiro sin contar con todos los elementos obligatorios disponibles y en buen estado.

A. Herramientas e instrumentos

La siguiente tabla lista las herramientas necesarias para ejecutar el retiro de forma segura y preservar la integridad del módulo. El carácter indica si el elemento es obligatorio para toda operación de retiro o solo aplica según las condiciones específicas del sistema.

Tabla 12. Herramientas e instrumentos a utilizar en la fase 1

Equipo / Herramienta o EPP	Especificación técnica	Carácter	Función en el retiro
Multímetro o detector de tensión DC	Rango mínimo 0–1000 V DC	OBLIGATORIO	Verificar ausencia de tensión antes de tocar cualquier conductor
Llave de torque o juego de llaves	Según sistema de montaje del fabricante	OBLIGATORIO	Aflojar los elementos de sujeción del módulo al racking
Destornilladores plano y de estrella	Varios tamaños; preferiblemente aislados	OBLIGATORIO	Retirar tornillos de fijación del marco y conectores
Pinzas de corte lateral aisladas	Aisladas 1000 V – IEC 60900	OBLIGATORIO	Corte controlado de cables DC en campo
Herramienta MC4 (MC4 unlocking tool)	Compatible con los conectores del módulo	OBLIGATORIO	Desconectar conectores MC4 sin dañarlos
Espátula plástica o palanca de plástico	Material no metálico	OBLIGATORIO	Separar el marco del vidrio sin aplicar fuerza abrasiva
Superficies acolchadas / mantas protectoras	EPS, foam o tela gruesa ≥ 5 mm	OBLIGATORIO	Apoyar el módulo sin contacto directo con superficies rígidas
Escalera certificada o plataforma elevadora	Según altura del sistema; certificada NTC 4116	SEGÚN APLIQUE	Acceso seguro a módulos en cubierta o estructuras elevadas

Nota. Elaboración propia con base en los estándares de seguridad para trabajos eléctricos y en altura del Ministerio de Trabajo de Colombia (Resolución 4272 de 2021) y en las recomendaciones técnicas de Bošnjaković et al. (2023) y Li et al. (2024).

B. Elementos de protección personal (EPP)

Los EPP son de uso obligatorio durante toda la operación de retiro. El nivel de protección requerido aumenta según la altura de trabajo y el estado físico del módulo (clasificación A, B o C). Los módulos Clase C (vidrio fracturado) requieren protección respiratoria adicional.

Tabla 13. EPP a utilizar en fase 1

EPP	Especificación técnica	Carácter	Función en el retiro
Casco de seguridad	Norma NTC 1523; clase E para trabajos eléctricos	OBLIGATORIO en altura	Protección contra caída de objetos en trabajos en altura
Guantes de protección mecánica	Nivel de corte mínimo C (ISO 13997)	OBLIGATORIO	Proteger manos de bordes cortantes del marco y vidrio
Gafas de seguridad	Policarbonato con protección lateral	OBLIGATORIO	Proteger ojos de fragmentos de vidrio y viruta metálica
Calzado de seguridad dieléctrico	Norma NTC 2396 / Clase 00 dieléctrico	OBLIGATORIO	Protección eléctrica y mecánica en campo
Arnés de seguridad + línea de vida	Norma NTC 2037; anclaje certificado	OBLIGATORIO altura $> 1,5$ m	Prevenir caídas en trabajos sobre cubiertas o estructuras

EPP	Especificación técnica	Carácter	Función en el retiro
Mascarilla N95 o P100	Filtración $\geq 95\%$ partículas $\geq 0,3\ \mu\text{m}$	CLASE C (vidrio roto)	Evitar inhalación de polvo de celdas en módulos fracturados

Nota. Elaboración propia con base en la Resolución 0312 de 2019 (estándares mínimos SST Colombia), NTC 1523, NTC 2396 y NTC 2037. Los EPP deben contar con certificación vigente al momento de su uso.

C. Lista de verificación previa al inicio del retiro

El responsable de la actividad debe completar la siguiente lista de verificación antes de intervenir el sistema. Cada ítem debe ser confirmado físicamente, no de memoria.

Tabla 14. Lista de verificación previa al inicio del retiro

✓	Criterio de verificación	Resultado
☐	Todos los equipos de la Tabla A están disponibles en campo y en buen estado.	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	Se verificó la carga / calibración del multímetro o detector de tensión.	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	Todos los EPP de la Tabla B están disponibles, inspeccionados y sin daños visibles.	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	El operario conoce el esquema de conexión del sistema (corriente continua y alterna).	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	El área de trabajo está delimitada y el acceso restringido a personal no autorizado.	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	Las superficies de apoyo para el módulo están limpias, acolchadas y libres de puntos cortantes.	☐ Conforme ☐ No conforme
☐	Si se trabaja en altura $> 1,5\text{ m}$: el arnés y la línea de vida están instalados y verificados.	☐ N/A ☐ Conforme ☐ No conforme

Nota. Lista de verificación para diligenciar en campo por el responsable del retiro antes de iniciar la actividad. En caso de resultado No conforme en cualquier ítem, suspender la actividad y corregir antes de proceder.

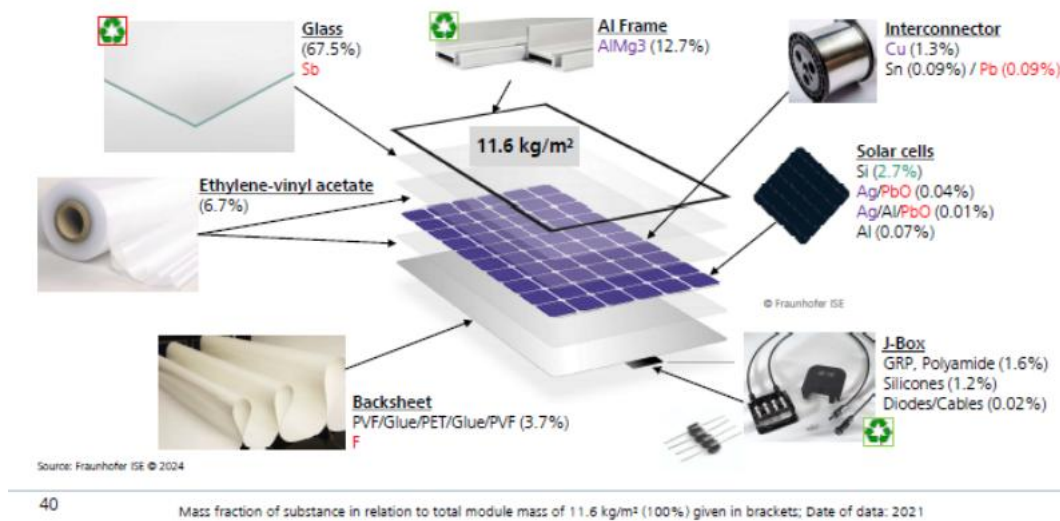
Responsable: _____ Fecha: _____ Firma: _____

5. Verificación técnica inicial del módulo retirado

La verificación que se plantea en esta sección no pretende “diagnosticar para reutilizar”, pues previamente se definió el flujo en residuo/reciclaje, sino que se realiza con el propósito de clasificar el estado del módulo para definir precauciones de manejo y priorizar controles en almacenamiento, transporte y pretratamiento.

La **Figura 10** presenta la composición material de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino con los porcentajes en masa de cada componente, información que orienta la inspección visual y fundamenta la clasificación del módulo durante esta fase.

Figura 10. Componentes y composición material de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino



Nota. Tomado de

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
Photovoltaics Report (p. 40), por Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2024).

5.1. Inspección visual (condición física)

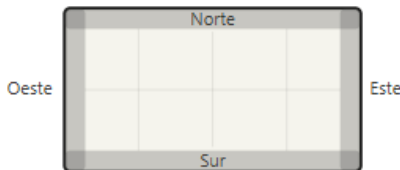
Para esta sección es importante verificar y registrar el estado de cada uno de los módulos retirados del sistema antes de proceder con el embalaje y transporte. A continuación se presentan las cinco condiciones que deben inspeccionarse, sus señales de alerta, las implicaciones en el proceso de gestión y las acciones específicas a ejecutar cuando cada condición se materializa.

Tabla 15. Condiciones a inspeccionar: Fractura de vidrio frontal, delaminación, deformación del marco, daño en caja de conexiones y cables y conectores

① Fractura de vidrio frontal	
Señales de alerta	• Fisuras visibles a simple vista, lineales o ramificadas. • Astillado en bordes o esquinas del módulo. • Rotura parcial o total del vidrio frontal. • Fragmentos sueltos sobre la superficie del módulo.
Implicación	Mayor riesgo de cortes y dispersión de fragmentos. Requiere embalaje reforzado y segregación inmediata. Posible exposición a partículas de sílice y materiales de las celdas (plomo en soldaduras, restos de silicio).
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	Los fragmentos pueden desprenderse durante el transporte y contaminar otros módulos o lesionar al operario. La exposición al polvo de celdas fracturadas puede generar riesgo tóxico por inhalación.

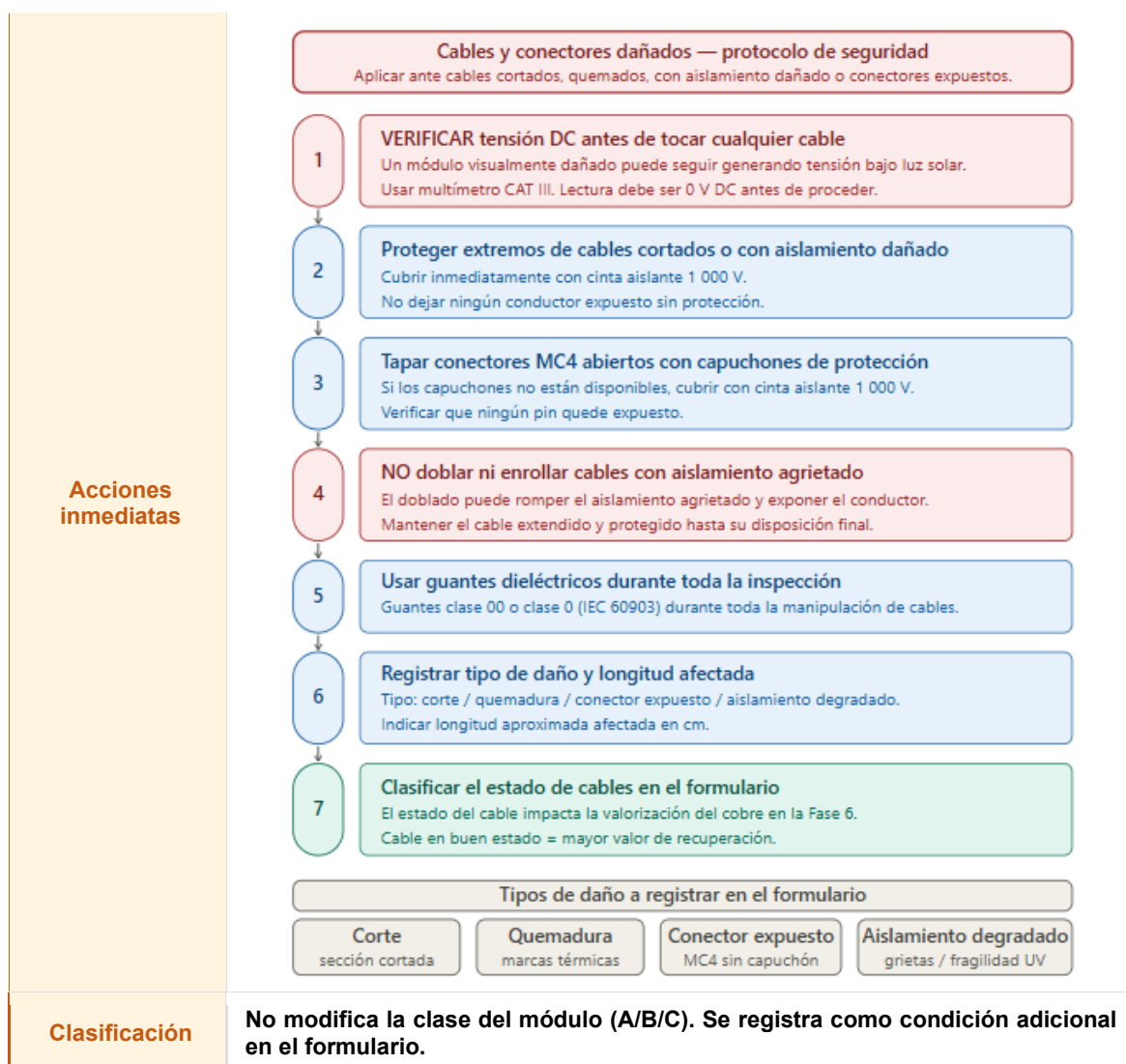
Acciones inmediatas	Módulo Clase C — vidrio fracturado Protocolo obligatorio. No omitir ningún paso. 1 Colocar manta protectora SOBRE el módulo Cubrir toda la superficie antes de tocarlo para contener fragmentos sueltos. 2 Usar guantes nivel C (ISO 13997) y mascarilla N95 EPP obligatorio en todo momento: guantes corte C + gafas + mascarilla N95. 3 NO sacudir, doblar ni inclinar bruscamente Los movimientos bruscos proyectan fragmentos. Mover con apoyo completo del marco. 4 Clasificar como Clase C y registrar en el formulario Describir tipo de fractura, área afectada y adjuntar fotografía del daño. 5 Embalar en contenedor cerrado o doble bolsa gruesa Embalar ANTES de mover. Etiquetar: "PELIGROSO — VIDRIO ROTO — CLASE C". 6 Alertar al gestor RAEE por escrito antes de la entrega Enviar notificación escrita con fotografía y descripción del estado del módulo. EPP obligatorio — Clase C Guantes Corte nivel C ISO 13997 Gafas Seguridad ANSI Z87.1 Mascarilla N95 / P100 NIOSH Calzado Dieléctrico NTC 2396
	Clasificación Clase C — Integridad baja. Embalaje especializado obligatorio.
② Delaminación	
Señales de alerta	- Burbujas o ampollas visibles entre las capas del laminado. - Zonas opacas, amarillentas o con cambio de color en el encapsulante EVA. - Desprendimiento visible del encapsulante en los bordes del módulo. - Entrada de humedad visible (condensación interna, manchas oscuras).
Implicación	Mayor fragilidad estructural del laminado. Posible ingreso de humedad que compromete el aislamiento eléctrico. El encapsulante degradado puede contener subproductos del EVA que requieren manejo cuidadoso.
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	La presión durante el transporte puede acelerar la separación de capas y generar rotura del vidrio. La humedad interna puede provocar corrientes de fuga o cortocircuitos si el módulo se conecta erróneamente.

Acciones inmediatas	Módulo Clase C — vidrio fracturado Protocolo obligatorio. No omitir ningún paso. - Colocar manta protectora SOBRE el módulo Cubrir toda la superficie antes de tocarlo para contener fragmentos sueltos. - Usar guantes nivel C (ISO 13997) y mascarilla N95 EPP en todo momento: guantes corte C + gafas + mascarilla N95. NO sacudir, doblar ni inclinar bruscamente el módulo Movimientos bruscos proyectan fragmentos. Mover con apoyo completo del marco. - Clasificar como Clase C y registrar en el formulario Describir tipo de fractura, área afectada y adjuntar fotografía del daño. - Embalar en contenedor cerrado o doble bolsa gruesa Embalar ANTES de mover. Etiquetar: "PELIGROSO — VIDRIO ROTO — CLASE C". - Alertar al gestor RAEE por escrito antes de la entrega Enviar notificación escrita con fotografía y descripción del estado del módulo. EPP obligatorio — Clase C Guantes Corte nivel C ISO 13997 Gafas Seguridad ANSI Z87.1 Mascarilla N95 / P100 NIOSH Calzado Dieléctrico NTC 2396
	Clasificación Clase B (delaminación parcial) o Clase C (delaminación severa con entrada de humedad).
	③ Deformaciones del marco
	Señales de alerta - Torsión visible en alguno de los cuatro perfiles del marco. - Abolladuras, aplastamiento o pérdida de sección en el perfil de aluminio. - Pérdida de rigidez: el módulo se flexiona con facilidad al sujetarlo por el marco. - Separación o rotura en las uniones de esquina del marco. Implicación Aumenta significativamente la probabilidad de fractura del vidrio frontal durante el transporte. Un marco deformado no distribuye correctamente los esfuerzos, generando puntos de concentración de tensión. ¿Qué puede ocurrir si no se actúa? Un marco torsionado que se apoya de forma irregular sobre el pallet puede fracturar el vidrio durante el traslado, convirtiendo un módulo Clase B en Clase C y aumentando el riesgo operativo.

Acciones inmediatas	Marco deformado — protocolo de inspección y clasificación Aplicar cuando el módulo presenta deformación del perfil de aluminio.	
	1	Documentar con fotografía la deformación Registrar tipo, ubicación en el marco y extensión de la deformación.
	2	Verificar si la deformación compromete el vidrio Inspeccionar con atención la zona del vidrio adyacente a la deformación.
	3	Clasificar como Clase B Deformación sin presión visible sobre el vidrio Clasificar como Clase C Si hay flexión visible que presiona el vidrio
	4	Usar soportes o calzas de foam en el pallet Compensar la irregularidad del marco para un apoyo uniforme y estable.
	5	Asegurar con correas adicionales en el pallet Evitar cualquier movimiento del módulo durante el transporte.
Clasificación	6	Indicar en el formulario la ubicación de la deformación Registrar el perfil afectado: Norte / Sur / Este / Oeste.
	Referencia de orientación del marco para el registro 	
Clase B (marco dañado, vidrio íntegro). Clase C si el vidrio ya presenta fisuras asociadas.		

④ Daño en caja de conexiones (junction box)		
Señales de alerta	• Desprendimiento total o parcial de la junction box del backsheet. • Fisuras, rotura o deformación de la carcasa plástica. • Presencia de humedad, corrosión o quemaduras en el interior. • Olor a quemado o decoloración de los cables de salida en la zona de la junction box.	
Implicación	Posible riesgo eléctrico residual por exposición de terminales internos o diodos de bypass dañados. Mayor fragilidad en la etapa de pretratamiento al retirar la junction box. Los quemados internos pueden indicar un arco eléctrico previo.	
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	Si se manipula una junction box dañada sin verificar tensión, el operario puede recibir una descarga. Una junction box desprendida puede engancharse durante el transporte y desgarrar el backsheet.	

Acciones inmediatas	Marco deformado — protocolo de inspección y clasificación Aplicar cuando el módulo presenta deformación del perfil de aluminio. 1 Documentar con fotografía la deformación Registrar tipo, ubicación en el marco y extensión de la deformación. 2 Verificar si la deformación compromete el vidrio Inspeccionar la zona del vidrio adyacente a la deformación. 3 Clasificar como Clase B Sin presión visible sobre el vidrio Clasificar como Clase C Flexión visible que presiona el vidrio 4 Usar soportes o calzas de foam en el pallet Compensar la irregularidad del marco para un apoyo uniforme y estable. 5 Asegurar con correas adicionales en el pallet Evitar cualquier movimiento del módulo durante el transporte. 6 Indicar en el formulario la ubicación de la deformación Registrar el perfil afectado: Norte / Sur / Este / Oeste. Referencia de orientación del marco para el registro Perfil Norte Perfil Oeste Perfil Este Perfil Sur
	Clasificación
	Clase B (junction box dañada, vidrio íntegro). Puede ser C si hay daño múltiple.
⑤ Cables y conectores	
Señales de alerta	• Cortes, aplastamientos o exposición del conductor interno del cable. • Quemaduras, carbonización o decoloración en cables o conectores MC4. • Conectores MC4 abiertos, sin capuchón de protección o con pines expuestos. • Cables con aislamiento resquebrajado, endurecido o agrietado por envejecimiento.
Implicación	Riesgo de contacto eléctrico accidental con conductores expuestos. Los conectores abiertos pueden generar arcos si se conectan accidentalmente. El aislamiento degradado puede contener materiales tóxicos (plomo en soldaduras, trazas de cadmio) que refuerzan la necesidad de manipulación cuidadosa (Li et al., 2024).
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	Un conductor expuesto bajo tensión puede causar una descarga eléctrica grave. Un conector abierto puede generar un arco al entrar en contacto con otro conductor o superficie metálica.



Nota. Elaboración propia con base en ISO 45001:2018, Li et al. (2024) y Bošnjaković et al. (2023), IEC 60900 y Gahlot et al. (2022)

Tabla 16. Tabla resumen, clasificación y acción por condición observada

Condición observada	Clase	Acción clave
Sin daños visibles	A	Embalaje estándar. Posible candidato a segunda vida.
Delaminación parcial / Marco deformado leve	B	Embalaje reforzado. Alertar al gestor RAEE.
Fractura de vidrio frontal	C	Contenedor cerrado. Mascarilla N95. Alerta obligatoria al gestor.
Junction box dañada (vidrio íntegro)	B	Asegurar JB con cinta. Manipulación reforzada en pretratamiento.
Junction box dañada + fractura de vidrio	C	Protocolo Clase C. Alerta doble al gestor RAEE.



Cables / conectores dañados	—	Proteger extremos. Registrar en formulario. No cambia la clase.
-----------------------------	---	---

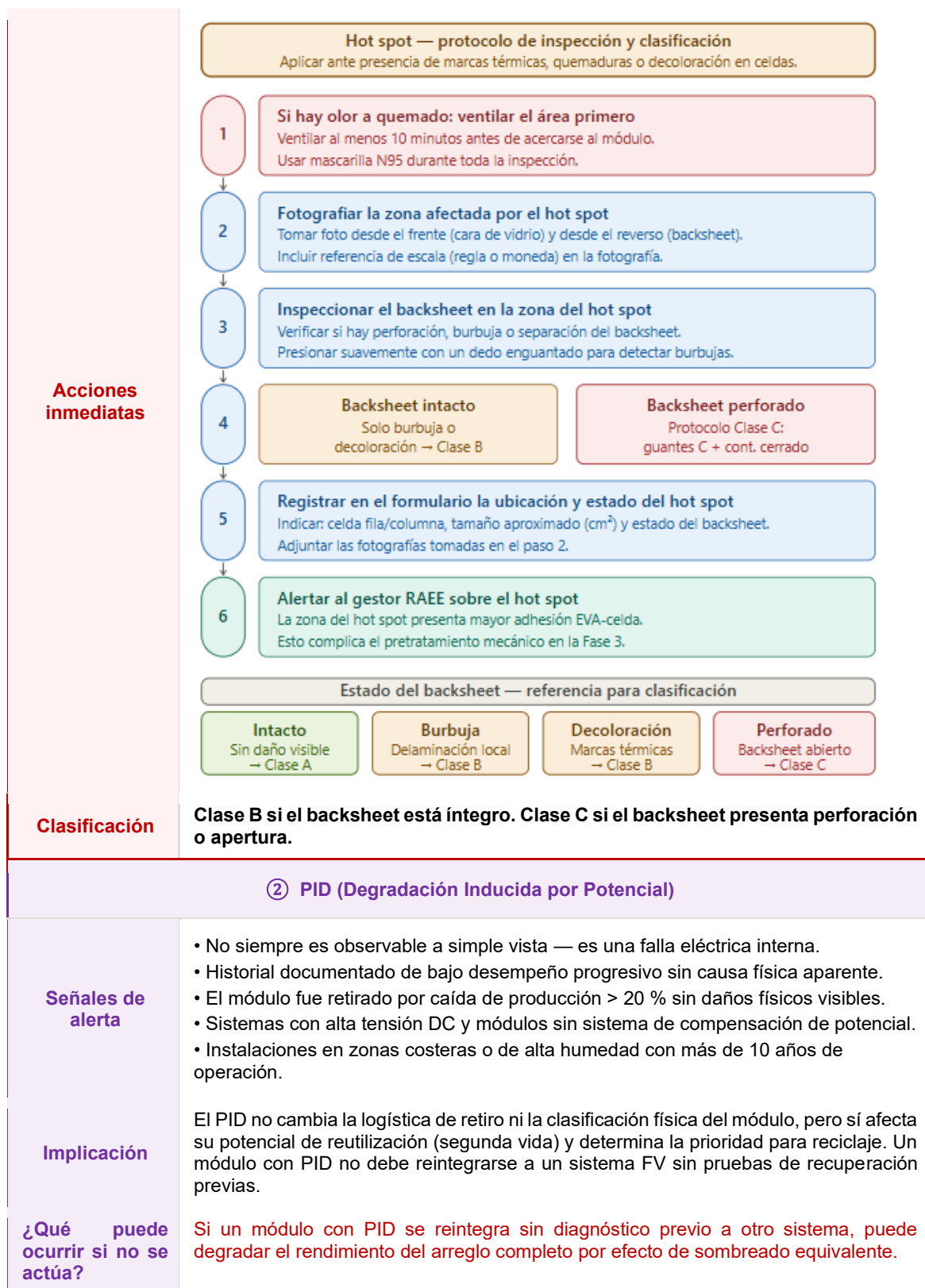
Nota. La clasificación A/B/C determina el tipo de embalaje, las precauciones de transporte y el nivel de alerta al gestor RAEE. Un módulo puede presentar más de una condición simultánea; en ese caso se asigna la clase más restrictiva. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023), Li et al. (2024) y Mahmoudi et al. (2021).

5.2. Señales de falla típica (condición funcional observable)

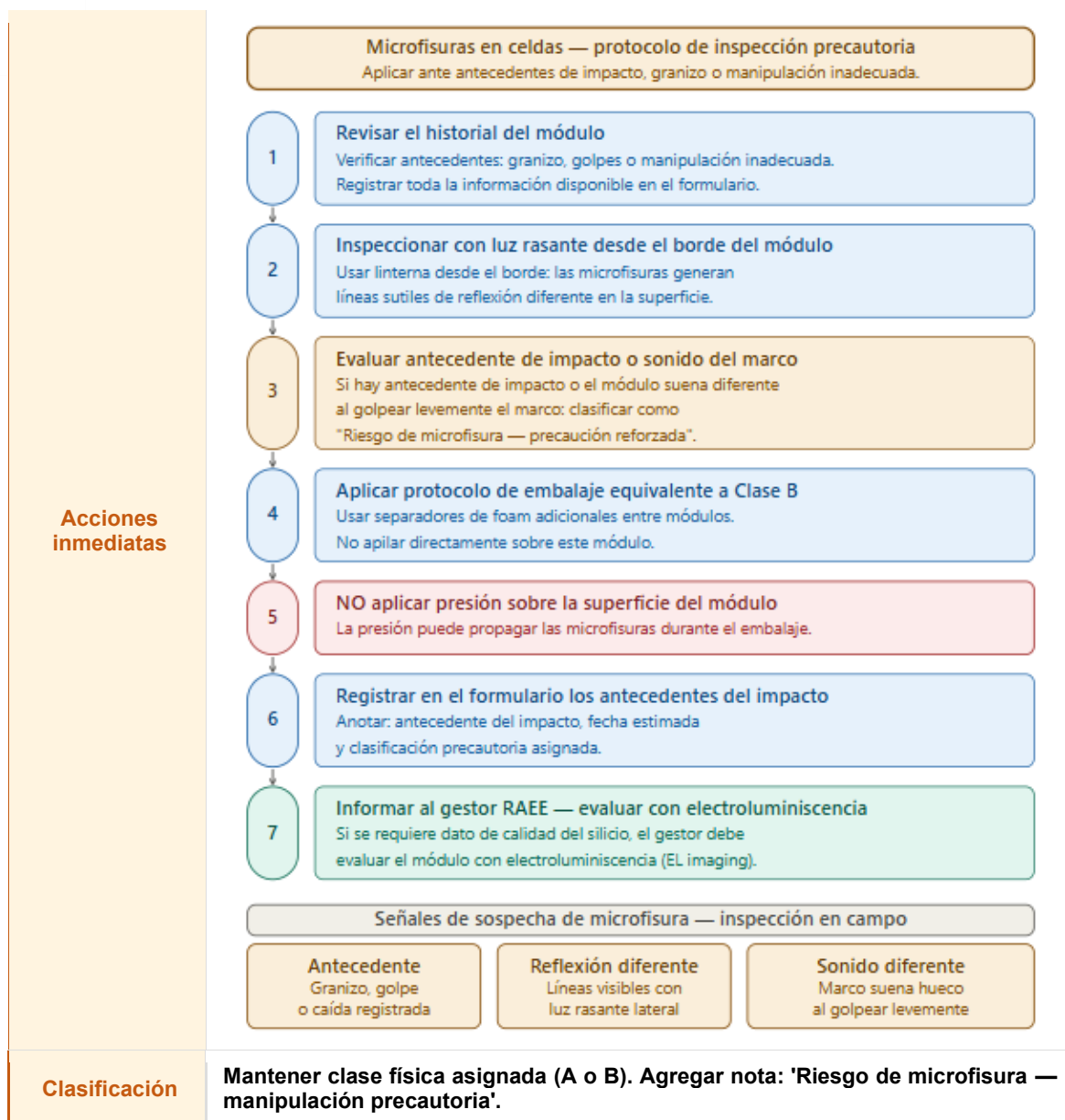
En caso de no contar con equipos avanzados de diagnóstico (electroluminiscencia, termografía infrarroja), el operario puede registrar señales visuales y contextuales asociadas a las tres fallas funcionales más frecuentes en módulos FV de silicio cristalino. A continuación, se presentan las señales de cada falla, sus implicaciones y las acciones específicas a ejecutar cuando se detectan.

Tabla 17. Señales de falla típicas

① Hot spots	
Señales de alerta	• Decoloración localizada en la cara frontal del módulo: zona amarilla, marrón o ennegrecida. • Marcas térmicas visibles en la lámina posterior (backsheet): manchas oscuras o ampollas puntuales. • Olor a quemado en alguna zona puntual del módulo. • Daño visible en una celda específica rodeada de celdas aparentemente sanas.
Implicación	Posible degradación interna severa en la celda afectada (cortocircuito interno, diodo de bypass dañado o célula sombreada de forma crónica). El módulo debe tratarse como frágil: el calor generado puede haber comprometido el encapsulante EVA y la adhesión del laminado en la zona del hot spot.
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	Si el backsheet presenta ampollas o quemaduras, puede estar perforado. Un backsheet roto expone los conductores internos y genera riesgo eléctrico y de contacto con materiales tóxicos del laminado.



Acciones inmediatas	PID (Potential Induced Degradation) — protocolo Aplicar ante sospecha de degradación eléctrica sin daño físico visible. 1 Marcar en el formulario como PID sospechoso Registrar: "Falla eléctrica probable — PID sospechoso". 2 Registrar el historial eléctrico disponible Anotar: Pmax, Voc e Isc medidos en campo, años de operación y tipo de inversor del sistema. 3 Medir Voc en campo y comparar con valor de placa Si se dispone de multímetro: medir tensión Voc en circuito abierto. Desviación > 15 % respecto al valor de placa refuerza la sospecha. Registrar el valor medido. 4 NO modificar la clase física por sospecha de PID El PID es falla eléctrica, no física. Mantener la clase asignada por inspección visual (A, B o C). 5 Etiquetar el módulo con advertencia de PID Adherir etiqueta: "POSIBLE PID — NO APTO PARA SEGUNDA VIDA SIN DIAGNÓSTICO". 6 Informar al gestor RAEE — priorizar recuperación de silicio Módulo con PID tiene bajo valor para segunda vida. Priorizar en procesos de recuperación de silicio (Fase 5–6). Indicadores de sospecha de PID — verificar en campo Pérdida de potencia Pmax medida < 85 % del valor de placa Voc reducida Desviación > 15 % respecto a placa Alta tensión de sistema Inversor sin transformador o sistema > 600 V DC
Clasificación	No modifica la clase física (A/B/C). Se registra como condición funcional adicional.
③ Microfisuras	
Señales de alerta	• Generalmente NO visibles a simple vista sin equipos de electroluminiscencia (EL). • Historial de exposición a granizo, viento extremo o impactos mecánicos documentados. • Módulo con antecedente de mala manipulación: caídas, golpes o vibraciones intensas. • Pérdida de potencia moderada (10–15 %) sin causa visual evidente. • Crujidos o ruidos leves al presionar levemente el marco del módulo.
Implicación	Las microfisuras no son visibles pero sí activas: reducen la potencia del módulo y pueden propagarse hasta convertirse en fracturas visibles bajo esfuerzo mecánico. Un módulo con microfisuras sospechadas debe manipularse con el mismo cuidado que uno Clase B.
¿Qué puede ocurrir si no se actúa?	Una microfisura existente puede propagarse durante el transporte y generar una fractura visible (Clase C), aumentando el riesgo operativo y el costo de gestión sin previo aviso.



Nota. Elaboración propia con base en Ansanelli et al. (2021), Bošnjaković et al. (2023) y Li et al. (2024).

Clasificación operativa recomendada (A / B / C)

La siguiente clasificación integra tanto las condiciones físicas observadas en el numeral anterior como las señales de falla funcional detectadas en este numeral. Debe asignarse la clase más restrictiva cuando un módulo presenta más de una condición simultánea. Esta clasificación define el nivel de protección en embalaje y el tipo de segregación para almacenamiento.

Tabla 18. Clasificación operativa de los módulos

Clase	Descripción	Condiciones que la definen	Nivel de embalaje requerido
A	Integridad alta	Sin fracturas ni delaminación severa. Sin hot spot en backsheet. Sin antecedente de impacto fuerte.	Estándar: pallet con separadores de cartón o foam entre módulos.
B	Integridad media	Delaminación parcial, marco deformado leve, hot spot con backsheet íntegro, riesgo de microfisura, junction box dañada (vidrio íntegro).	Reforzado: separadores de foam gruesos, sin apilado. Asegurar con correas adicionales.
C	Integridad baja	Fractura de vidrio (parcial o total), backsheet perforado, daños severos o múltiples combinados.	Especializado: contenedor cerrado o doble bolsa gruesa. Manipulación con guantes nivel C y mascarilla N95.

Nota. Elaboración propia con base en Bošnjaković et al. (2023), Li et al. (2024), Mahmoudi et al. (2021) e IEA-PVPS (2021). Para diagnóstico preciso de PID y microfisuras se recomienda evaluación con equipo de electroluminiscencia o termografía infrarroja en instalaciones del gestor RAEE.

6. Salida de la fase

Una vez finalizada la Fase 1 y se sigan las recomendaciones planteadas en el procedimiento, cada módulo retirado debe quedar con las siguientes características: Físicamente retirado y debidamente estabilizado, clasificado (A/B/C), identificado para trazabilidad interna y listo para embalaje según su condición (Fase 2).

Marco normativo aplicable: El retiro de módulos fotovoltaicos se enmarca en el Decreto 4741 de 2005 y la Política Nacional RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Si bien estos instrumentos no contemplan específicamente los residuos fotovoltaicos, constituyen el referente regulatorio vigente en Colombia para su gestión, lo que refuerza la necesidad de instrumentos técnicos complementarios como la presente guía.

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 19. Indicadores cumplimiento fase 1

Indicadores de cumplimiento	
☐	El sistema fotovoltaico fue desconectado eléctricamente y se verificó ausencia de tensión antes del retiro del módulo.
☐	El módulo fue retirado sujetándolo por el marco de aluminio, sin aplicar presión directa sobre el vidrio frontal.



Indicadores de cumplimiento	
☐	Se registró el motivo de retiro del módulo (fin de vida útil / falla / repotenciación).
☐	El módulo fue clasificado como Clase A, B o C según su estado físico tras la inspección visual.
☐	Se asignó un código de identificación interno al módulo para su trazabilidad en etapas posteriores.

Nota. Elaboración propia

FASE 2. MANEJO LOGÍSTICO DEL MÓDULO RETIRADO (MANIPULACIÓN, EMBALAJE Y TRANSPORTE)

1. Objetivo de la fase

Para la fase de manejo logístico se abarcan las actividades necesarias para trasladar los módulos fotovoltaicos retirados desde el sitio de desmontaje hasta la instalación donde se realizará su tratamiento posterior teniendo como objetivo principal el preservar la integridad estructural de los módulos y evitar daños adicionales que puedan dificultar los procesos de desensamble y reciclaje. En este mismo sentido, el manejo inadecuado de módulos fotovoltaicos puede provocar fracturas del vidrio frontal o deformaciones del marco, lo que dificulta los procesos posteriores de reciclaje y recuperación de materiales (Deng et al., 2022; Mahmoudi et al., 2021). Por esta razón, durante esta etapa se deben aplicar buenas prácticas de manipulación y embalaje las cuales reduzcan el riesgo de daño estructural.

En el contexto de las Zonas No Interconectadas (ZNI), la logística de la Fase 2 presenta desafíos adicionales derivados de la distancia a los centros urbanos, la limitada disponibilidad de vehículos de carga y la ausencia de gestores RAEE en las proximidades del proyecto. El operador AOM es responsable de planificar con anticipación la logística de traslado de los módulos retirados, coordinando con la entidad pública propietaria del sistema y con el gestor RAEE receptor la ruta, el vehículo, el embalaje adecuado y los tiempos de traslado. Cuando las restricciones logísticas impidan el traslado inmediato, el operador AOM debe aplicar los protocolos de almacenamiento temporal condicional descritos en la sección 2.6 de esta guía. En ningún caso los módulos retirados pueden permanecer abandonados en la comunidad sin embalaje adecuado ni trazabilidad documentada.

2. Manipulación segura de los módulos para ejecutar el proceso logístico

Durante la etapa de manipulación de los paneles es importante tener en cuenta que los módulos retirados deben manipularse de forma controlada para evitar esfuerzos mecánicos que puedan comprometer su estructura, de esta manera es que se recomienda tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Es de vital importancia sujetar los módulos por el marco de aluminio, evitando así generar presión directa sobre el vidrio frontal para de esta manera no generar fisuras o fracturas que dificulten la disposición final.
- Durante el transporte desde el sitio de retiro hasta el lugar de disposición, es importante mencionar que los módulos deben movilizarse en posición vertical o con inclinación controlada.
- Al momento de cargar los módulos en el vehículo de transporte, se debe evitar a toda costa impactos contra superficies duras en el centro del panel.
- En ningún momento se deben arrastrar los módulos sobre el suelo.
- Por último y tal como se recomienda en la fase 1 de desinstalación, se debe evitar apoyar los módulos sobre esquinas o bordes pronunciados que puedan alterar la estructura original del panel.

Es importante tener presente que para la manipulación de los módulos fotovoltaicos se deben minimizar las cargas puntuales y los esfuerzos mecánicos sobre el vidrio frontal dado que dichos esfuerzos o cargas podrían

generar fracturas o microfisuras que afectarían la integridad estructural del panel (Ansanelli et al., 2021; Mao et al., 2024). En este sentido los módulos que fueron clasificados en la fase 1 como Clase C (fractura de vidrio) requieren mayor precaución durante la manipulación del proceso logístico entre el sitio de origen y el destino final de disposición para evitar así la liberación de fragmentos.

3. Embalaje de los módulos

Las condiciones climáticas de Colombia representan un factor técnico determinante en la selección y aplicación de los materiales de embalaje. El país presenta una alta diversidad climática, con regiones de precipitación anual superior a los 4 000 mm (Pacífico), zonas cálidas con alta humedad relativa (Costa Atlántica, Llanos Orientales) y áreas con lluvias frecuentes en la región Andina. Esta variabilidad climática incide directamente en el comportamiento del cartón corrugado doble, material que pierde hasta el 80 % de su resistencia mecánica cuando se satura de humedad, comprometiendo la protección del vidrio frontal y la integridad estructural del módulo durante el transporte (Mahmoudi et al., 2021; IEA-PVPS, 2021). Por esta razón, la selección del material de embalaje no puede realizarse de manera uniforme para todo el territorio nacional, sino que debe considerar la región climática del recorrido de transporte y las condiciones meteorológicas previstas para la fecha del traslado. En este paso, el embalaje deberá realizarse utilizando métodos simples y

de bajo costo que permitan asegurar la estabilidad de los módulos durante su traslado, sin que su estructura se afecte durante el recorrido; el método más común para realizar esta acción consiste en el uso de pallets con orientación vertical, donde los módulos se colocan uno junto a otro utilizando separadores de cartón, espuma u otro material protector entre cada panel con el único propósito de que no se tengan impactos directos entre los módulos y así mitigar el riesgo de afectación en la superficie del panel. Este sistema de embalaje permite:

- Reducir la presión sobre el vidrio frontal.
- Evitar contacto directo entre módulos.
- Facilitar su manipulación mediante equipos de carga.

Al finalizar la ubicación de los módulos y se encuentren ubicados en el pallet, los módulos deben asegurarse haciendo el uso correcto de correas o cintas de sujeción para evitar desplazamientos a un lado u otro durante el transporte.

3.1. Equipos e insumos necesarios

El embalaje debe realizarse con métodos simples y de bajo costo que aseguren la estabilidad de los módulos durante el traslado sin comprometer su estructura. El método recomendado es el uso de pallets con orientación vertical, con separadores protectores entre módulos y sujeción con correas al finalizar la carga. Antes de iniciar el embalaje, el responsable debe verificar la disponibilidad de todos los equipos e insumos listados en las tablas siguientes.

▲ Criterio de suspensión: La ausencia de cualquier insumo clasificado como OBLIGATORIO es criterio suficiente para suspender el embalaje hasta garantizar su disponibilidad. No embalar sin contar con todos los elementos obligatorios.

A. Estructura de soporte

El pallet es la unidad de soporte que agrupa los módulos para su traslado. Debe ser de dimensiones adecuadas al módulo y contar con capacidad de carga suficiente para el lote a transportar.

Tabla 20. Insumos o equipos de la estructura de soporte fase 2

Insumo / Equipo	Especificación técnica	Carácter	Función en el embalaje
Pallet de madera estándar	1,20 m × 1,00 m; capacidad ≥ 500 kg; sin clavos expuestos	OBLIGATORIO	Base de soporte y unidad de carga para el traslado de los módulos
Pallet plástico reutilizable	1,20 m × 1,00 m; HDPE; capacidad ≥ 600 kg	ALTERNATIVA	Alternativa al pallet de madera; mayor durabilidad y resistencia a humedad
Soporte vertical tipo 'A' o 'L'	Metálico o de madera; altura mínima igual al largo del módulo	SEGÚN APLIQUE	Para módulos de gran formato (> 2,0 m) que requieren soporte lateral reforzado

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021), Bošnjaković et al. (2023), Mahmoudi et al. (2021) y Decreto 4741 de 2005. La resistencia mecánica del cartón corrugado al agua está referenciada en la norma ISO 535:2014 (absorción de agua por cartón — método Cobb).

B. Materiales de protección y separación entre módulos

Los separadores evitan el contacto directo entre módulos y reducen la presión sobre el vidrio frontal. El tipo de separador depende de la clasificación del módulo (A/B/C).

Tabla 21. Insumos de protección y separación — condiciones de uso según zona climática de Colombia

Insumo / material	Especificación técnica	Carácter	Uso por clase	Observaciones climáticas — Colombia
Cartón corrugado doble (uso estándar en zonas secas)	Espesor ≥ 5 mm; dimensiones ≥ tamaño del módulo	OBLIGATORIO	Clase A y B	Separador entre módulos. LIMITACIÓN CLIMÁTICA: pierde resistencia mecánica con humedad ≥ 80 % HR. No usar en zonas de alta precipitación sin capa de protección plástica exterior.
Cartón corrugado doble con laminado plástico exterior	Cartón bituminado o con recubrimiento PE en cara exterior; espesor ≥ 5 mm	OBLIGATORIO en zonas cálidas húmedas	Clase A, B y C en regiones con alta precipitación (Costa Atlántica, Llanos, Pacífico, Amazonía)	Alternativa al cartón estándar en condiciones climáticas adversas. Mantiene resistencia mecánica hasta 95 % HR.
Lámina de foam / espuma de polietileno	Espesor ≥ 10 mm; densidad media (20–30 kg/m³)	OBLIGATORIO Clase B/C	Clase B y C	Separador con mayor absorción de impactos. No absorbe humedad. Preferible al cartón en zonas de alta precipitación.
Manta protectora de tela o neopreno	Tejido grueso o neopreno ≥ 3 mm	OBLIGATORIO	Todas las clases	Cubrir la cara de vidrio antes del siguiente módulo. Resistente a la humedad. No se degrada con agua.
Bolsa plástica gruesa (polietileno)	Calibre ≥ 6; cierre hermético tipo ziploc o termosellado	OBLIGATORIO Clase C	Clase C	Contener el módulo con vidrio roto. En zonas húmedas: usar también para

Insumo / material	Especificación técnica	Carácter	Uso por clase	Observaciones climáticas — Colombia
				Clase B como protección exterior del cartón.
Film estirable (stretch wrap) — capa exterior del pallet	Calibre $\geq 20 \mu\text{m}$; 4–6 capas sobre el pallet completo	OBLIGATORIO en trayectos con riesgo de lluvia	Todas las clases	Barrera hidrófuga exterior del pallet. Protege el cartón interior de la humedad ambiental y la precipitación directa. Aplicar siempre antes de cargar en vehículo tipo estacas.
Lona impermeable (tarpaulin) sobre el pallet	Lona de PVC o polietileno $\geq 200 \mu\text{m}$; atada o enganchada al pallet	OBLIGATORIO en vehículos tipo estacas o plataforma abierta	Todas las clases	Protección adicional en vehículos sin techo fijo. Indispensable en zonas de alta precipitación cuando se usa vehículo de plataforma.

Nota. Elaboración propia con base en (IEA-PVPS, 2021; Bošnjaković et al., 2023; Mahmoudi et al., 2021; Decreto 4741, 2005)

C. Elementos de sujeción y fijación al pallet

Una vez cargados los módulos en el pallet, deben asegurarse para evitar desplazamientos laterales o volcamiento durante el transporte.

Tabla 22. Insumos y equipos para fijar al pallet en fase 2

Insumo / Equipo	Especificación técnica	Carácter	Función
Correas de sujeción con trinquete	Ancho $\geq 25 \text{ mm}$; resistencia $\geq 250 \text{ kg}$; longitud según pallet	OBLIGATORIO	Asegurar el conjunto de módulos al pallet; evitar volcamiento en curvas
Cinta de fletar / zunchos plásticos	Ancho $\geq 16 \text{ mm}$; espesor $\geq 0,5 \text{ mm}$; tensión manual	ALTERNATIVA	Opción de menor costo; adecuado para lotes pequeños o distancias cortas
Film estirable (stretch wrap)	Calibre $\geq 20 \mu\text{m}$; 3–4 capas sobre el pallet	RECOMENDADO	Estabilizar el conjunto y proteger de polvo y humedad en el trayecto
Esquineros de cartón reforzado	Perfil en 'L'; altura igual a la del pallet cargado	RECOMENDADO	Proteger las esquinas del pallet de impactos durante la carga / descarga

Nota. Elaboración propia con base en (IEA-PVPS, 2021; Mahmoudi et al., 2021; EN 12195-2, 2004; Decreto 1609, 2002)

D. Herramientas y equipos de manejo

Tabla 23. Herramientas y equipos de maneja en fase 2

Herramienta / Equipo	Especificación técnica	Carácter	Función
Carro de transporte / carretilla	Plataforma plana; capacidad $\geq$ peso del pallet cargado	OBLIGATORIO	Movilizar el pallet cargado hasta el vehículo sin arrastrar
Montacargas manual (patín hidráulico)	Capacidad $\geq 1.000 \text{ kg}$; horquillas $\geq 1,20 \text{ m}$	SEGÚN APLIQUE	Para operaciones con ≥ 10 módulos por lote o pallets de mayor peso
Pistola de fletar / tensionador de zunchos	Manual o neumática; compatible con el tipo de zuncho	SEGÚN APLIQUE	Tensar correctamente los zunchos plásticos sin dañar el embalaje

Herramienta / Equipo	Especificación técnica	Carácter	Función
Tijeras o cutter de seguridad	Hoja retráctil o protegida	OBLIGATORIO	Cortar materiales de embalaje sin riesgo de contacto con el módulo
Marcador permanente / etiquetas adhesivas	Resistente a la intemperie; adhesivo fuerte	OBLIGATORIO	Identificar cada pallet con código de trazabilidad y clase del módulo

Nota. Elaboración propia con base en (IEA-PVPS, 2021; Bošnjaković et al., 2023; Resolución 2400, 1979; ISO 45001, 2018; Decreto 4741, 2005)

E. Elementos de protección personal (EPP) durante el embalaje

Tabla 24. EPP a utilizar durante el embalaje en fase 2

EPP	Especificación técnica	Carácter	Riesgo que mitiga
Guantes de protección mecánica	Nivel de corte mínimo C (ISO 13997)	OBLIGATORIO	Bordes cortantes del marco y fragmentos de vidrio (Clase C)
Gafas de seguridad	Polycarbonato con protección lateral	OBLIGATORIO	Fragmentos de vidrio o partículas durante el embalaje
Calzado de seguridad	Punta de acero; suela antideslizante	OBLIGATORIO	Caída de módulos o componentes sobre los pies
Mascarilla N95	Filtración ≥ 95 % partículas $\geq 0,3 \mu\text{m}$	OBLIGATORIO Clase C	Polvo de celdas fracturadas en módulos Clase C

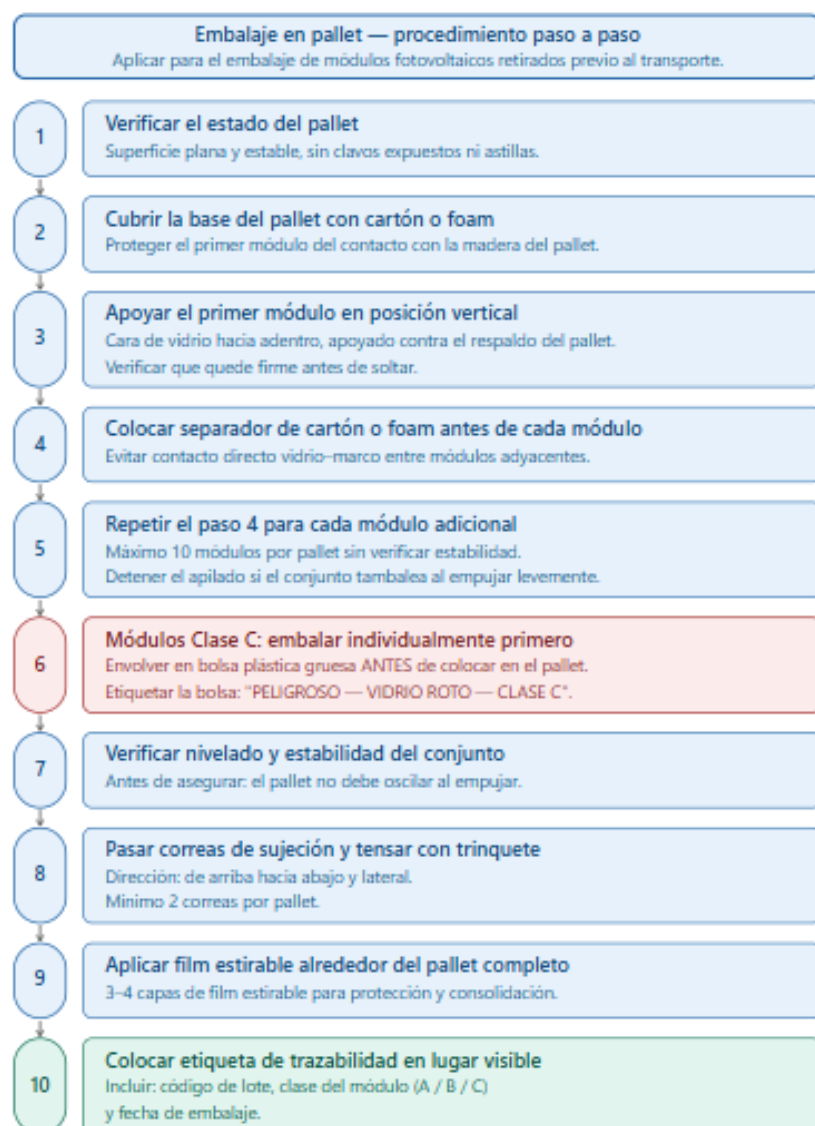
Nota. Elaboración propia con base en (ISO 13997, 1999; ANSI/ISEA Z87.1, 2020; NTC 2396, 2009; NIOSH, 1995; Resolución 2400, 1979; Li et al., 2024)

Tabla 25. Resumen insumos requeridos según clasificación del módulo

Insumo	Clase A	Clase B	Clase C
Pallet de madera/plástico	✓	✓	✓
Cartón corrugado doble	✓	✓	✓
Foam / lámina de polietileno	—	✓	✓
Manta protectora	✓	✓	✓
Bolsa plástica gruesa	—	—	✓
Perfil espuma en bordes	—	✓	✓
Correas de sujeción	✓	✓	✓
Film estirable (stretch wrap)	✓	✓	✓
Mascarilla N95	—	—	✓

Nota. ✓ = requerido; — = no aplica como mínimo (puede usarse como mejora). Elaboración propia con base en Mahmoudi et al. (2021), IEA-PVPS (2021) y Bošnjaković et al. (2023).

Figura 11. Procedimiento de embalaje en pallet para módulos fotovoltaicos retirados



Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021)

Para los Contextos B, C y D, el embalaje estándar de cartón corrugado doble descrito anteriormente es insuficiente por su alta susceptibilidad a la humedad y su incapacidad de absorber las vibraciones de los medios de transporte no convencionales. Los materiales de embalaje reforzado descritos en la siguiente tabla deben reemplazar o complementar el embalaje estándar en todos los proyectos ZNI.

Tabla 26. Elementos de embalaje reforzado para transporte en Contextos ZNI (B, C y D)

Elemento de embalaje	Especificación técnica	Carácter y aplicación	Justificación para contextos ZNI
Caja de madera ligera o polipropileno expandido (caja PP)	Contenedor rígido individual por módulo. Dimensiones interiores: módulo + 3 cm cada lado.	OBLIGATORIO para transporte fluvial y en mula. RECOMENDADO	La caja inmoviliza completamente el módulo e impide los golpes por movimiento irregular del medio de transporte. Reusable en múltiples

Elemento de embalaje	Especificación técnica	Carácter y aplicación	Justificación para contextos ZNI
	Peso de la caja vacía: < 5 kg. Cierre con argollas o correas.	para avioneta y motocarguero.	operaciones de retiro, lo que reduce el costo por módulo.
Espuma de polietileno de alta densidad (EPE) como forro interior	Lámina de EPE de 30–50 mm en todas las caras interiores de la caja. Densidad: 30–40 kg/m ³ . Color blanco o gris (refleja calor).	OBLIGATORIO en los cuatro contextos de transporte ZNI (B, C y D).	Absorbe vibraciones, golpes laterales y movimiento ondulatorio fluvial. Supera ampliamente la protección del cartón corrugado en condiciones de humedad y temperatura extremas.
Bolsa hermética de polietileno grueso (sello zip o termosellado)	Calibre ≥ 8. Cierre hermético antes de introducir el módulo en la caja. Dimensiones: al menos 10 cm más grandes que el módulo.	OBLIGATORIO para transporte fluvial (Contexto C y D). RECOMENDADO en todos los contextos ZNI por la alta humedad ambiental.	Barrera primaria contra el ingreso de agua, humedad y fauna. Protege los conectores MC4 y el backsheet de la contaminación por agua fluvial o lluvia de trayecto.
Lona de PVC ≥ 200 µm (cubierta exterior del conjunto)	Cubre la totalidad de la carga sobre la embarcación, motocarguero o estructura de transporte. Atada o enganchada con cuerdas en tensión.	OBLIGATORIO en todos los medios de transporte ZNI expuestos a la intemperie.	Protección exterior contra lluvia, spray fluvial, sol directo y vegetación durante el recorrido. Segunda barrera después de la bolsa hermética individual.
Correas de amarre con trinquete (ancho ≥ 25 mm)	Mínimo 2 correas cruzadas por pallet o por unidad de carga. Resistencia ≥ 250 kg	OBLIGATORIO en todos los medios de transporte.	Evita el desplazamiento de la carga por movimiento del medio de transporte. En embarcaciones: anclar las correas a los bordes estructurales, no a componentes móviles.

Nota. Elaborada con base en los requisitos de protección mecánica para carga frágil (ISO 6780:2003), las condiciones climáticas ZNI del Atlas Climatológico del IDEAM (2015) y los principios de logística fluvial para equipos electrónicos. La caja de polipropileno expandido es el elemento de mayor costo-efectividad para operaciones repetidas de retiro.

4. Manejo diferenciado / especializado, según la condición del módulo

La clasificación realizada en la Fase 1 (A, B o C) permite aplicar medidas diferenciadas de manejo durante el embalaje, almacenamiento y transporte. Cada nivel activa precauciones específicas derivadas de los estándares ISO aplicables en materia de seguridad y salud en el trabajo (ISO 45001:2018), gestión ambiental (ISO 14001:2015) y trazabilidad (ISO 9001:2015). La siguiente tabla integra el manejo recomendado con las precauciones ISO por clase de módulo.

 **Nota:** Las normas ISO son marcos de referencia internacionales voluntarios, pero reconocidos por la ANLA y las CARs como estándar técnico para evaluar la idoneidad de los procesos de gestión. Su aplicación fortalece la posición del gestor ante las autoridades ambientales.

Tabla 27. Clasificación según afectación del módulo y precauciones ISO aplicables.

Clasificación	Condición del módulo	Manejo recomendado	Precauciones ISO aplicables
Clase A	Módulo íntegro — sin fracturas ni delaminación severa.	Embalaje estándar en pallet con separadores de cartón o foam.	ISO 45001:2018 — SST: • Guantes mecánicos y gafas de seguridad durante toda la manipulación. • Verificar que los pallets estén en buen estado antes de cargar. • No superar la capacidad de carga del pallet. ISO 14001:2015 — Ambiental: • Identificar el módulo con código de trazabilidad antes de almacenar. • Registrar el estado y la clase asignada en el sistema de seguimiento.
Clase B	Daños moderados — delaminación parcial o marco deformado leve.	Separadores reforzados (foam $\geq$ 10 mm). Correas adicionales de sujeción.	ISO 45001:2018 — SST: • Guantes de corte nivel B o C: la delaminación puede exponer bordes filosos. • Dos operarios para módulos con marco deformado — mayor riesgo de fractura en el levantamiento. • Alertar al transportador sobre el estado del módulo antes de cargar. • Inspeccionar el área de apoyo: soporte irregular puede propagar la deformación. ISO 14001:2015 — Ambiental: • Registrar tipo de daño, extensión y ubicación antes de embalar. • Separar físicamente Clase B de Clase A en el área de almacenamiento temporal. • Informar al gestor RAEE sobre el nivel de delaminación — afecta el pretratamiento.
Clase C	Vidrio fracturado — daños severos o múltiples.	Contenedor cerrado o doble bolsa gruesa. EPP completo obligatorio.	ISO 45001:2018 — SST: • Guantes corte nivel C (ISO 13997) OBLIGATORIOS — fragmentos de vidrio templado son extremadamente filosos. • Mascarilla N95 o P100: polvo de celdas fracturadas puede contener partículas de silicio, plomo y cadmio (Li et al., 2024). • Colocar manta protectora SOBRE el módulo antes de tocarlo para contener fragmentos sueltos. • Nunca sacudir, doblar ni inclinar bruscamente — los fragmentos pueden proyectarse.

Clasificación	Condición del módulo	Manejo recomendado	Precauciones ISO aplicables
			• Demarcar el área y restringir acceso a personal sin EPP completo. • Disponer de kit de primeros auxilios accesible durante toda la operación. ISO 14001:2015 — Ambiental: • Embalar en contenedor rígido cerrado ANTES de mover a la zona de acopio. • Etiquetar: 'PELIGROSO — VIDRIO ROTO — RESIDUO FV CLASE C'. • Notificar por escrito al gestor RAEE receptor antes de la entrega — incluir fotografía del daño. • No mezclar con módulos de otras clases en el mismo pallet o contenedor. ISO 9001:2015 — Trazabilidad: • Fotografiar el módulo antes y después del embalaje. • Registrar: tipo de fractura, porcentaje de área afectada y acciones tomadas.

Nota. Elaboración propia con base en ISO 45001:2018, ISO 14001:2015, ISO 9001:2015, IEC 62446-1:2016, Mahmoudi et al. (2021) e IEA-PVPS (2021).

Tabla 28. Normas ISO referenciadas, descripción y aplicación específica

Norma ISO	Ámbito	Aplicación en la Fase 2 — Manejo diferenciado
ISO 45001:2018	Seguridad y salud en el trabajo	Define EPP obligatorios por clase, restricciones de acceso al área y procedimientos ante incidentes (fractura en manipulación, exposición a polvo de celdas). Es la norma central para definir las medidas de protección del operario según el nivel de riesgo de cada clase.
ISO 14001:2015	Gestión ambiental	Obliga a identificar y controlar los aspectos ambientales de la operación: segregación por clase, etiquetado de residuos, prevención de dispersión de fragmentos y registro de flujos de residuos generados durante el embalaje y transporte.
ISO 9001:2015	Gestión de la calidad — Trazabilidad	Marco para el registro fotográfico del estado de cada módulo antes del embalaje, la asignación del código de clase y la documentación que acompañará al módulo hasta el gestor RAEE receptor.
IEC 62446-1:2016	Documentación de sistemas FV	Define los datos mínimos a registrar al retirar un módulo: identificación, potencia nominal, estado observable. Complementa la trazabilidad exigida por ISO 9001 en el contexto específico de sistemas fotovoltaicos.
ISO 31000:2018	Gestión del riesgo	Orienta la proporcionalidad de las medidas de control por clase: Clase A (riesgo bajo — precauciones básicas), Clase B (riesgo medio — refuerzo de EPP y procedimientos), Clase C (riesgo alto — protocolo completo).

Nota. Elaboración propia. La implementación de estas normas en el proceso de gestión de módulos FV no es exigida por la normativa colombiana vigente, pero constituye una mejor práctica reconocida internacionalmente.

5. Transporte de módulos fotovoltaicos

El transporte de módulos fotovoltaicos retirados debe realizarse en vehículos habilitados que aseguren la estabilidad de la carga durante el traslado. La selección del vehículo depende del volumen del lote, la distancia a recorrer y la clasificación (A/B/C) de los módulos. A continuación se presentan los cuatro tipos de vehículo recomendados con sus especificaciones técnicas, requerimientos de carga y condiciones de uso (IEA-PVPS, 2021; Mahmoudi et al., 2021).

Tabla 29. Protocolo de embalaje según región climática colombiana y nivel de riesgo para el embalaje FV

Región / departamentos	Condiciones climáticas relevantes	Nivel de riesgo para el embalaje	Protocolo de embalaje y transporte recomendado
Costa Atlántica (Guajira, Atlántico, Magdalena, Bolívar, Sucre, Córdoba)	Cálida seca / cálida húmeda. Precipitación: 500–2 000 mm/año. Temperatura: 27–35 °C.	ALTA para módulos FV. Zona prioritaria de expansión solar en Colombia.	Cartón con laminado plástico obligatorio. Film estirable en 6 capas. Lona impermeable si se usa vehículo de plataforma. Verificar hermeticidad del embalaje antes de cargar.
Llanos Orientales (Meta, Casanare, Vichada, Arauca)	Cálida con lluvias intensas. Precipitación: 2 000–4 000 mm/año. Temperatura: 26–32 °C.	ALTA. Proyectos agroindustriales y expansión solar rural creciente.	Máxima protección: foam en lugar de cartón. Film estirable 6 capas + lona. Vehículo con furgón cerrado obligatorio para Clase B y C.
Región Andina (Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle, Eje Cafetero)	Variable. Pisos térmicos: frío a cálido. Precipitación: 1 000–3 000 mm/año. Lluvias frecuentes.	MEDIA-ALTA. Mayor concentración de instalaciones FV urbanas y comerciales.	Cartón estándar aceptable en períodos secos. En época de lluvias (abril–mayo y octubre–noviembre): cartón laminado o foam + film estirable.
Región Pacífica (Chocó, Valle costero, Nariño costero)	Muy húmeda. Precipitación: 4 000–12 000 mm/año. Temperatura: 24–28 °C.	MUY ALTA para degradación de embalaje. Zona con proyectos off-grid y rurales.	Prohibido el uso de cartón sin protección plástica. Foam obligatorio. Furgón cerrado o vehículo cubierto como requisito mínimo. Embalaje hermético en bolsa plástica antes de colocar en pallet.
Región Andina alta (Bogotá, Medellín, Manizales > 2 000 m.s.n.m.)	Fría a templada. Precipitación moderada. Temperatura: 10–20 °C. Baja humedad relativa en períodos secos.	BAJA-MEDIA. Menor riesgo de humedad en períodos secos.	Cartón estándar aceptable en épocas secas. Film estirable recomendado. Verificar pronóstico antes de transportar; suspender si se prevén lluvias fuertes sin vehículo cubierto.

Nota. Clasificación climática elaborada con base en los datos de precipitación del IDEAM (Atlas Climatológico de Colombia, 2015) y adaptada a las condiciones de embalaje de módulos fotovoltaicos conforme a IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021).

⚠ Requisito previo: Antes de iniciar el transporte, verificar que todos los pallets estén debidamente asegurados con correas de sujeción y que el vehículo cuente con habilitación vigente para el tipo de carga. Si los módulos tienen características de peligrosidad (Clase C con backsheet perforado), aplicar los requisitos del Decreto 4741 de 2005.

5.1. Consideraciones climáticas para el transporte — protocolo diferenciado por región

El transporte de módulos fotovoltaicos en Colombia debe considerar las condiciones climáticas de la ruta como variable técnica de planificación, no como eventualidad. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) reporta que el 60 % del territorio colombiano presenta precipitaciones anuales superiores a 2 000 mm, con regiones donde la lluvia puede presentarse en cualquier mes del año. El transporte de módulos en condiciones de humedad extrema, sin las medidas de protección adecuadas, puede provocar la saturación del cartón corrugado, la corrosión prematura del marco de aluminio, la infiltración de humedad en los conectores MC4 y el deterioro de las etiquetas de trazabilidad, comprometiendo tanto la integridad del módulo como la cadena de custodia documental (Mahmoudi et al., 2021; Bošnjaković et al., 2023).

⚠ Protocolo de verificación climática previa al despacho: Antes de autorizar el despacho de cualquier lote de módulos, el responsable debe: (1) consultar el pronóstico meteorológico del IDEAM para la ruta de transporte en las próximas 24–48 horas; (2) verificar que el embalaje seleccionado es adecuado para las condiciones previstas; y (3) confirmar que el vehículo cuenta con cobertura impermeable en buen estado. Si se prevén lluvias moderadas o fuertes y el vehículo no tiene furgón cerrado o carpa en perfectas condiciones, posponer el despacho hasta que las condiciones sean favorables.

5.2. Clasificación del contexto de acceso y selección del protocolo de transporte

Antes de planificar el transporte de los módulos retirados, el operador AOM o el responsable de la Fase 2 debe identificar el contexto de acceso del proyecto según la clasificación siguiente. El contexto de acceso determina el tipo de medio de transporte aplicable, el protocolo de embalaje requerido y la modalidad de almacenamiento temporal. En proyectos ZNI (Contextos C y D), el operador AOM debe documentar el contexto de acceso en el formulario de trazabilidad como parte del registro de la Fase 2.

Tabla 30. Clasificación del contexto de acceso y protocolo de transporte aplicable

Contexto de acceso	Descripción y ejemplos	Medio de transporte recomendado	Protocolo aplicable
Contexto A — Acceso terrestre optimizado (vías primarias o secundarias pavimentadas)	Proyectos FV urbanos, periurbanos, en capitales departamentales o en zonas con carretera pavimentada hasta el sitio. Sistemas residenciales, comerciales e industriales interconectados.	Vehículos terrestres convencionales (camioneta, camión liviano, camión pesado) descritos en las fichas técnicas de vehículos de la guía. Protocolo estándar de embalaje (sección 2.3).	Aplicar el protocolo estándar de la guía sin modificaciones. La totalidad de los lineamientos de transporte de la Fase 2 aplican directamente.
Contexto B — Acceso terrestre limitado (vías)	Proyectos FV rurales con acceso por vía sin pavimentar. Comunidades accesibles en vehículo	Vehículo 4x4 o doble tracción con capacidad ≤ 1 500 kg. Embalaje reforzado con foam en lugar de	Aplicar el protocolo ZNI de embalaje reforzado de la sección nueva 2.5.B. La restricción de peso del vehículo limita los lotes;

Contexto de acceso	Descripción y ejemplos	Medio de transporte recomendado	Protocolo aplicable
terciarias, caminos de herradura, suelos blandos)	todo terreno pero con restricciones de tonelaje, ancho de vía o estado del camino. Parte de la red rural colombiana.	cartón (por vibraciones). Pallets de menor dimensión (europaleta 80 × 120 cm). Velocidad máxima recomendada: 30 km/h en tramos sin pavimentar.	dividir la operación en varios viajes si es necesario.
Contexto C — Acceso multimodal (combinación fluvial + terrestre o aéreo + terrestre)	Proyectos FV en ZNI con acceso parcial por vía terrestre y tramos por río navegable o vuelo en aeronave de baja capacidad. Regiones Amazónica, Pacífica, Orinoquía e insular.	Logística multimodal secuencial: empaque individual por módulo para transporte fluvial/aéreo + vehículo todo terreno en tramos terrestres. Ver Tabla de esta sección (fichas técnicas de medios no convencionales).	Aplicar el protocolo multimodal ZNI descrito en la sección nueva 2.5.C. El almacenamiento temporal en la comunidad es OBLIGATORIO y debe cumplir los requisitos mínimos de infraestructura ZNI.
Contexto D — Acceso exclusivamente fluvial o aéreo (sin acceso terrestre al punto de retiro)	Proyectos FV en comunidades indígenas, asentamientos ribereños o islas accesibles únicamente por río, lancha o aeronave. Principalmente Amazonía, Pacífico y zonas insulares.	Empaque individual hermético por módulo. Transporte en canoa, lancha o avioneta hasta punto de consolidación regional. Desde el punto de consolidación: vehículo convencional o envío al gestor RAEE.	El almacenamiento temporal en la comunidad es OBLIGATORIO hasta que se acumule el volumen mínimo para la operación logística (ver sección 2.6 ZNI). La entidad financiadora (IPSE) debe coordinar la logística de retiro con anticipación.

Nota. Clasificación elaborada con base en el sistema de clasificación vial del INVIAS (primaria, secundaria, terciaria y caminos de herradura), los esquemas de logística fluvial y aérea en ZNI reportados por el IPSE (2024) y los principios de gestión sostenible de residuos en territorios de difícil acceso (Ganesan & Valderrama, 2022; IEA-PVPS, 2021).

5.3. Fichas técnicas de vehículos

A. Fichas técnicas por tipo de vehículo

Tabla 31. Ficha técnica camioneta de carga tipo furgón o doble cabina con plataforma

 Camioneta de carga (tipo furgón o doble cabina con plataforma)	
Capacidad de carga	500 kg – 1.000 kg de carga útil.
Tipo de carrocería	Furgón cerrado (ideal) o plataforma con toldo / carpa impermeable. Piso de madera o metal antideslizante.
Módulos aprox. por viaje	8 – 20 módulos estándar (60–72 celdas) por viaje, en 1–2 pallets.
Requerimientos técnicos	• Piso plano sin obstáculos que impidan la colocación estable del pallet. • Puntos de anclaje laterales o traseros para asegurar las correas de sujeción. • Toldo o carrocería cerrada para proteger de lluvia y sol directo. • Conductor con experiencia en carga frágil; velocidad máxima recomendada: 60 km/h en vías urbanas.

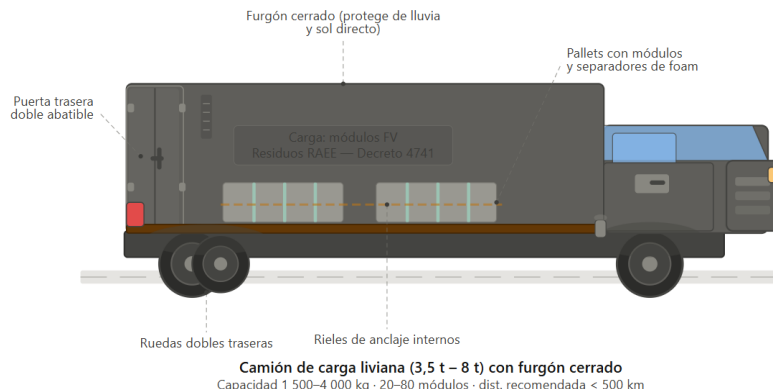
Esquema camioneta de carga	Camioneta de carga — doble cabina con plataforma Capacidad 500–1 000 kg · 8–20 módulos · dist. recomendada < 200 km
Cuándo usarlo	Lotes pequeños (1–2 pallets). Retiros residenciales, comerciales pequeños o proyectos de hasta 10 kWp. Distancias cortas a medianas (< 200 km).
Restricciones / consideraciones	No apto para módulos de gran formato (> 2,0 m) si la longitud de la plataforma no es suficiente. Verificar que el módulo más largo quepa completamente dentro del espacio de carga sin sobresalir.

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021)

Tabla 32. Ficha técnica camión de carga liviana (3,5 t – 8 t) con furgón o carpa

 Camión de carga liviana (3,5 t – 8 t) con furgón o carpa	
Capacidad de carga	1.500 kg – 4.000 kg de carga útil.
Tipo de carrocería	Furgón metálico cerrado o carrocería de estacas con carpa impermeable tensada. Piso con puntos de anclaje.
Módulos aprox. por viaje	20 – 80 módulos estándar por viaje, en 2–5 pallets.
Requerimientos técnicos	• Carrocería con rieles o puntos de anclaje laterales para correas de sujeción. • Suspensión en buen estado: vibraciones excesivas pueden propagar microfisuras en los módulos. • Carpa o furgón cerrado: los módulos no deben exponerse a lluvia directa ni impactos de granizo durante el transporte. • Conductor con licencia C2 o superior; capacitado en transporte de carga frágil. • Si los módulos presentan clasificación C: informar al conductor antes de cargar.

Esquema Camión de carga liviana



Cuándo usarlo

Lotes medianos (2–5 pallets). Proyectos industriales, medianos sistemas FV (10–100 kWp). Distancias medias a largas (hasta 500 km).

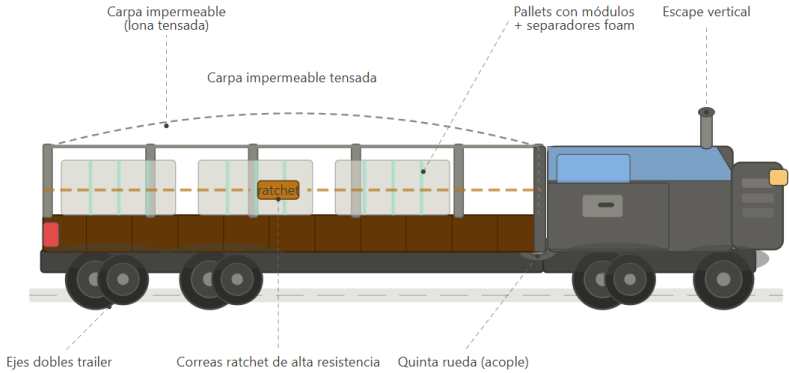
Restricciones / consideraciones

Para módulos con clasificación Clase C (vidrio roto), reforzar la sujeción con correas adicionales y verificar que los contenedores estén correctamente cerrados antes de iniciar el trayecto.

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021)

Tabla 33. Ficha técnica camión de carga pesada (> 8 t) con trailer o plataforma

🚚 Camión de carga pesada (> 8 t) con trailer o plataforma	
Capacidad de carga	8.000 kg – 25.000 kg de carga útil.
Tipo de carrocería	Trailer con carpa o furgón de gran volumen. Plataforma con sistema de amarre y protección lateral.
Módulos aprox. por viaje	80 – 400 módulos estándar por viaje, en 5–20 pallets o más.
Requerimientos técnicos	• Sistema de amarre profesional (ratchet straps de alta resistencia, cadenas de seguridad). • Piso antideslizante o uso de stops de madera para evitar desplazamiento de pallets. • Velocidad máxima recomendada: 80 km/h en carretera; reducir en vías en mal estado. • Conductor con licencia C3 o superior y manifiesto de carga para residuos si aplica Decreto 4741 de 2005. • Verificar permisos de transporte de RAEE si algún lote supera las cantidades umbral de la normativa.

Esquema Camión de carga pesada	 Camión pesado (> 8 t) con trailer y carpa — cabeza tractora + semirremolque Capacidad 8 000–25 000 kg · 80–400 módulos · cobertura nacional
Cuándo usarlo	Lotes grandes. Parques solares (> 100 kWp), operaciones de desmantelamiento masivo o envíos a plantas de reciclaje con lotes de varios cientos de módulos. Distancias largas o nacionales.
Restricciones / consideraciones	Requiere planificación logística previa: reserva de vehículo, manifiesto de carga si aplica la normativa RAEE, y coordinación con el gestor RAEE receptor para la recepción del lote.

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021)

Tabla 34. Aptitud de vehículos según condiciones climáticas — transporte de módulos fotovoltaicos en Colombia

Tipo de vehículo	Aptitud climática	Condiciones de uso aceptables	Requisitos específicos por condición climática
Furgón cerrado (metálico o fibra)	✓ ÓPTIMO para las todas condiciones climáticas	Todas las zonas. Todas las clases.	Protección completa contra lluvia, humedad ambiental, sol directo y cambios bruscos de temperatura. Requerido para Clase B y C en zonas de alta precipitación.
Camioneta doble cabina con plataforma + lona impermeable	✓ ACEPTABLE con medidas complementarias	Zonas de baja-media precipitación. Clase A en zonas húmedas.	La lona debe cubrir todo el pallet y estar tensada y anclada. El film estirable debajo de la lona es obligatorio. No aceptable para Clase C.
Camión estacas con carpa impermeable tensada	⚠ CONDICIONADO — verificar integridad de la carpa	Zonas de baja precipitación. Clase A únicamente en zonas húmedas.	La carpa debe ser de PVC o polietileno $\geq 200 \mu\text{m}$ y estar herméticamente sellada en los bordes. Inspeccionar antes de cargar: cualquier rasgadura invalida el uso del vehículo para este transporte.
Camión estacas SIN cubierta	✗ PROHIBIDO en zonas con riesgo de lluvia	No aceptable en zonas húmedas ni en trayectos largos.	El uso de este tipo de vehículo sin cobertura adecuada en zonas de alta precipitación incrementa el riesgo de saturación del cartón corrugado, lo que puede comprometer la integridad de los módulos y la seguridad del transporte. No autorizar el despacho.

Tipo de vehículo	Aptitud climática	Condiciones de uso aceptables	Requisitos específicos por condición climática
Tráiler o semirremolque con carpa o furgón	✓ ÓPTIMO para lotes grandes	Todas las zonas. Todas las clases.	La carpa debe estar tensada y en perfectas condiciones. Si el recorrido supera 6 horas, verificar la carpa en cada parada de descanso.

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021), Mahmoudi et al. (2021) y Decreto 1609 de 2002. La prohibición del vehículo tipo estacas sin cubierta en zonas húmedas se fundamenta en la susceptibilidad del cartón corrugado a la humedad y el principio de responsabilidad en la custodia del residuo establecido en el Decreto 4741 de 2005.

⊘ **Prohibición expresa — vehículo tipo estacas sin cubierta en zonas húmedas:** El uso de vehículos tipo estacas o plataforma abierta sin lona impermeable en perfectas condiciones está expresamente prohibido para el transporte de módulos fotovoltaicos en zonas con precipitación media anual superior a 1 500 mm o cuando el pronóstico meteorológico indique lluvia durante el trayecto. La saturación del cartón corrugado por lluvia directa puede comprometer la protección del vidrio frontal y resultar en daños que eleven la clasificación del módulo de Clase A a Clase B o C, incrementando los costos de gestión y el riesgo para el operario.

B. Selección rápida — vehículo según volumen y clasificación

Tabla 35. Selección rápida de vehículo según volumen y clasificación

Tipo de vehículo	Lote (N.º módulos)	Dist. recomendada	Clase A/B	Clase C
Camioneta (furgón/plataforma)	8 – 20	< 200 km	✓	✓ con correas adicionales
Camión 3,5 t – 8 t	20 – 80	< 500 km	✓	✓ alertar al conductor
Camión pesado / trailer	80 – 400+	Nacional	✓	✓ con manifiesto RAEE si aplica

Nota. Elaboración propia con base en IEA-PVPS (2021), Mahmoudi et al. (2021) y el Decreto 4741 de 2005 (Colombia). La cantidad de módulos por viaje es referencial para módulos estándar de 60–72 celdas (~1,7 m × 1,0 m, ~20 kg). Módulos de mayor formato reducen el número de unidades por viaje.

C. Buenas prácticas y prácticas a evitar durante el transporte

Tabla 36. Buenas prácticas y prácticas a evitar durante el transporte

✗ Prácticas que deben evitarse	✓ Buenas prácticas recomendadas
Apilar módulos horizontalmente sin soporte intermediario	Transportar en posición vertical o con inclinación controlada con pallet
Transportar módulos sin asegurar al vehículo	Asegurar los pallets con mínimo 2 correas de trinquete dentro del vehículo
Usar vehículos descubiertos sin carpa en condiciones de lluvia	Usar furgón o carpa impermeable para proteger de lluvia y granizo
Exceder la capacidad de carga del vehículo	Verificar el peso total del lote antes de cargar; respetar la carga útil
Viajar a velocidades excesivas en vías en mal estado	Reducir velocidad en vías irregulares para minimizar vibraciones y golpes
Colocar carga pesada sobre los módulos	Verificar que ninguna carga adicional ejerza presión sobre los módulos

Nota. Buenas prácticas elaboradas con base en IEA-PVPS (2021), Bošnjaković et al. (2023) y las recomendaciones de la normativa de transporte de carga del Ministerio de Transporte de Colombia (Decreto 1609 de 2002 para carga peligrosa).

5.4. Protocolos de transporte para medios no convencionales — Contextos C y D (ZNI)

En los Contextos C y D, el transporte de módulos fotovoltaicos retirados requiere medios no convencionales que no habían sido contemplados en la versión anterior de la guía. La ausencia de protocolos adaptados para estos medios constituye el principal factor de riesgo de abandono de módulos en las comunidades ZNI, con consecuencias ambientales y sanitarias para las poblaciones. Los siguientes protocolos establecen las condiciones mínimas de embalaje, sujeción y protección para cada medio de transporte disponible en territorios ZNI, priorizando la seguridad del módulo y la viabilidad operativa del operador AOM.

⚠ Principio de viabilidad logística en ZNI: Un módulo mal embalado para un medio de transporte no convencional es mejor que un módulo abandonado en la comunidad. Los protocolos de esta sección establecen el estándar mínimo requerido, no el óptimo. Si el operador AOM no puede cumplir el estándar mínimo de embalaje para el medio disponible, debe almacenar el módulo temporalmente hasta que sea posible ejecutar el transporte en condiciones adecuadas.

Tabla 37. Protocolos de embalaje y transporte para medios no convencionales en Contextos ZNI (C y D)

Medio de transporte	Capacidad y restricciones	Protocolo de embalaje adaptado	Riesgos específicos	Medidas de control
Canoa motorizada / lancha fluvial	Capacidad típica: 300–800 kg útil. Longitud útil de carga: 3–6 m.	Módulos embalados individualmente en bolsa hermética de polietileno + foam lateral. Apilar horizontalmente con vidrio hacia arriba. Máximo 2 módulos por capa. Asegurar con cuerdas a los bordes de la embarcación.	Módulos en contacto con agua. Movimiento ondulatorio constante. Exposición solar directa en trayectos largos.	Cubrir la totalidad de la carga con lona impermeable. Priorizar transporte en horario temprano (menor oleaje fluvial). Nunca sobrecargar la embarcación. Si el módulo es Clase C: doble bolsa hermética y contenedor rígido.
Mula / caballo de carga (arriero)	Capacidad típica: 80–120 kg por animal. Ancho máximo de carga: 60 cm a cada lado.	Un módulo estándar (20–25 kg) por animal, posición vertical, protegido con foam en todas las caras y embalado en caja de madera ligera (polipropileno expandido). Nunca apilar dos módulos en el mismo animal.	Golpes por movimiento irregular del animal. Contacto con vegetación. Lluvia en caminos de herradura. Alta vibración en terrenos irregulares.	Construir o conseguir caja de madera o polipropileno con espuma interior. El módulo debe quedar completamente inmovilizado dentro de la caja. Agregar empuñaduras laterales para facilitar el montaje. Verificar estado de la caja antes de cada tramo.
Avioneta / aeronave de baja capacidad	Capacidad típica: 300–700 kg útil. Restricción de dimensiones según bodega	Módulos de formato estándar (hasta 1 720 × 1 140 mm): transportable según dimensiones	Restricciones de peso y volumen estrictas. Presión y temperatura variables en	Coordinar con el operador de la aeronave el número máximo de módulos por vuelo. El módulo debe ir en compartimento de carga

Medio de transporte	Capacidad y restricciones	Protocolo de embalaje adaptado	Riesgos específicos	Medidas de control
	(generalmente < 2,0 m de largo, < 0,8 m de ancho).	de bodega. Embalaje individual en espuma rígida (EPS) + film estirable. Peso máximo por unidad: según límites de la aerolínea. Posición horizontal obligatoria.	altitud. Riesgo de daño por manipulación brusca en pistas no pavimentadas.	cerrado, no en asientos. Verificar que el embalaje no supere las dimensiones de la bodega del avión específico. Asegurar con correas al piso de la bodega.
Vehículo 4x4 / motocarguero / moto con plataforma	Capacidad típica motocarguero: 300–600 kg. Capacidad moto: 80–150 kg.	Motocarguero: hasta 4–6 módulos estándar sobre estructura de madera con foam. Moto: máximo 1–2 módulos en posición vertical, asegurados con correas. Velocidad máxima recomendada: 20 km/h en trocha.	Vibraciones intensas en vías sin pavimentar. Contacto con vegetación. Lluvia frecuente. Barro en épocas de invierno.	Cubrir la carga con lona impermeable. Verificar que los módulos no sobresalgan más de 30 cm lateralmente. Detener la operación si el camino está en condiciones de lodo que impliquen riesgo de volteo. Usar cuerdas de amarre adicionales.

Nota. Protocolos elaborados con base en los principios de protección mecánica para carga frágil (ISO 6780:2003), las condiciones logísticas de ZNI reportadas por el IPSE y los lineamientos de gestión de residuos en territorios de difícil acceso (IEA-PVPS, 2021; Mahmoudi et al., 2021). La autorización de cada medio de transporte es responsabilidad del operador AOM conforme a la normativa de transporte especial de Colombia (Decreto 1609 de 2002).

6. Almacenamiento temporal (condicional)

El almacenamiento temporal es una etapa condicional de la Fase 2 que debe utilizarse únicamente cuando no sea posible trasladar los módulos directamente a la instalación de tratamiento o reciclaje. Su carácter transitorio no exime al responsable de garantizar las condiciones mínimas de conservación del módulo durante el período de acopio, dado que las condiciones del área de almacenamiento inciden directamente en la calidad de los materiales recuperables en las fases posteriores de tratamiento y valorización (Mahmoudi et al., 2021; IEA-PVPS, 2021).

En la práctica, las áreas de acopio disponibles en Colombia presentan con

frecuencia limitaciones que deben ser identificadas y corregidas antes de utilizarlas para el almacenamiento de módulos fotovoltaicos. Entre las condiciones adversas más frecuentes se encuentran: la ausencia de cubierta impermeable adecuada, el contacto directo de los módulos con el suelo, el ingreso de fauna (roedores, aves, insectos) y el uso compartido del espacio con herramientas, materiales y productos incompatibles. Cualquiera de estas condiciones puede provocar humedad en los conectores MC4, contaminación del backsheet, degradación del embalaje y daños en el laminado que eleven la clasificación del módulo de Clase A a Clase B o C, incrementando los costos y los riesgos de la gestión posterior (Bošnjaković et al., 2023; Li et al., 2024).

La presente sección establece las condiciones mínimas que debe cumplir cualquier área de acopio utilizada para el almacenamiento temporal de módulos fotovoltaicos, las medidas correctivas

ante condiciones adversas identificadas y los criterios de inspección y reclasificación que el responsable debe aplicar durante el período de almacenamiento.

Tabla 38. Condiciones mínimas requeridas en el área de acopio para almacenamiento temporal de módulos fotovoltaicos

Condición requerida	Justificación técnica	Especificación mínima y alternativas
Cubierta impermeable	El área debe contar con techo o cubierta que impida el ingreso directo de lluvia sobre los módulos. En zonas de alta precipitación (Costa Atlántica, Pacífico, Llanos) la cubierta es condición mínima no negociable.	Bodega cerrada con techo sólido (primera opción). Carpa impermeable de PVC ≥ 200 μm bien tensada y anclada (alternativa para acopio provisional en campo). Sin cubierta: no autorizar el almacenamiento temporal.
Aislamiento del suelo	Ningún módulo debe estar en contacto directo con el suelo o con superficies húmedas. El contacto con suelo puede producir humedad ascendente, contaminación de los conectores y degradación del backsheet.	Pallets de madera o plástico (mín. 10 cm de altura). Superficie de concreto seco como base mínima. Sin pallet disponible: usar tabloncillos de madera o perfiles de acero como sustituto temporal. Prohibido apoyar sobre tierra, arena o grama.
Control de acceso de fauna	El área de acopio debe estar cerrada o delimitada de forma que impida el ingreso de roedores, aves o insectos. La fauna puede dañar el embalaje, los cables y los conectores MC4, y contaminar las superficies del módulo.	Puerta con cierre y sin huecos en paredes o zócalos. Malla perimetral cuando no hay estructura cerrada. Revisar el área antes de ingresar módulos: retirar nidos, excrementos o indicios de infestación. Si hay fauna presente: tratar el área antes de usarla como acopio FV.
Uso exclusivo o segregación física	o Cuando el área de acopio se comparte con otros materiales o herramientas, los módulos FV deben estar físicamente segregados mediante cinta de señalización, conos o barrera física. La proximidad de herramientas pesadas, productos químicos o materiales punzantes incrementa el riesgo de daño mecánico o contaminación.	Delimitar una zona exclusiva para módulos FV dentro del área compartida (mín. 1 m de separación lateral de otros materiales). Señalizar con cinta amarilla o cono: 'MÓDULOS FV — NO OBSTRUIR'. No almacenar junto a combustibles, lubricantes, ácidos o productos químicos.
Ventilación y temperatura	y El área de acopio debe estar ventilada para evitar la acumulación de calor. La exposición prolongada a temperaturas > 70 $^{\circ}\text{C}$ puede degradar el encapsulante EVA y acelerar la delaminación en módulos Clase B.	Evitar áreas metálicas sin ventilación (contenedores cerrados bajo sol directo en zonas cálidas). Si el almacenamiento supera 72 horas, verificar que la temperatura interior no supere 50 $^{\circ}\text{C}$. Orientar los módulos alejados de la incidencia solar directa.
Duración máxima del almacenamiento temporal	El almacenamiento temporal es condicional y debe minimizarse. Períodos prolongados incrementan el riesgo de deterioro adicional, especialmente en módulos Clase B y C.	Módulos Clase A: máximo 30 días en condiciones controladas. Módulos Clase B: máximo 15 días; inspección visual cada 7 días. Módulos Clase C: máximo 7 días; gestión prioritaria por riesgo de contaminación de otras fracciones. Superado el plazo: reportar al gestor RAEE y documentar la prórroga con justificación en el formulario de trazabilidad.

Nota. Elaborada con base en Mahmoudi et al. (2021), Bošnjaković et al. (2023), IEA-PVPS (2021), Li et al. (2024) y el Decreto 4741 de 2005 (condiciones de almacenamiento de residuos con características de peligrosidad para módulos Clase C).

⚠ Criterio de suspensión del almacenamiento temporal: Si el área de acopio no puede cumplir simultáneamente con las condiciones de cubierta impermeable, aislamiento del suelo y control de fauna, el almacenamiento temporal no está autorizado. En ese caso, los módulos deben permanecer en el vehículo de transporte o trasladarse a una instalación con condiciones adecuadas. Almacenar en condiciones inadecuadas puede comprometer la trazabilidad, incrementar los costos de tratamiento y generar responsabilidad normativa ante la autoridad ambiental.

Tabla 39. Diagnóstico de condiciones adversas y medidas correctivas para el área de acopio de módulos fotovoltaicos

Condición adversa identificada	Riesgos para los materiales y para la valorización	Medida correctiva inmediata	Criterio de reclasificación o suspensión
Cubierta ausente o deteriorada (goteras, roto)	Saturación del embalaje de cartón. Contacto de agua con conectores MC4 y backsheet. Riesgo de corrosión del marco de aluminio.	Cubrir de inmediato con lona impermeable de PVC atada al pallet. Si no hay lona: trasladar los módulos bajo techo antes de que llueva.	Suspender el almacenamiento en ese espacio hasta reparar la cubierta. Documentar la condición en el formulario de trazabilidad.
Módulos apoyados directamente sobre el suelo	Humedad ascendente por capilaridad. Contaminación del backsheet y los conectores con tierra, agua estancada o agentes biológicos.	Elevar inmediatamente sobre pallets o tablones de madera. Limpiar el backsheet y los conectores con paño seco.	Verificar estado del backsheet: si presenta humedad o contaminación, reclasificar el módulo a Clase B o C según corresponda.
Presencia de fauna (roedores, aves, insectos)	Daño en cables y embalaje por mordedura de roedores. Contaminación de superficies por excrementos. Nidos dentro del área que pueden obstruir conectores MC4.	Retirar inmediatamente los módulos del área contaminada. Limpiar y desinfectar el espacio antes de reingresarlos.	Inspeccionar visualmente los cables, conectores y embalaje de todos los módulos afectados. Reclasificar si se detectan daños. Implementar barrera física (malla) antes de realmacenar.
Área compartida con herramientas pesadas o productos químicos	Riesgo de impacto mecánico por caída de herramientas. Contaminación por derrames de lubricantes, combustibles o solventes que pueden degradar el backsheet y el encapsulante.	Segregar físicamente los módulos con barrera o cinta de señalización. Retirar los materiales incompatibles (químicos, herramientas pesadas) del radio de 1 m.	Si ya hubo contacto con sustancias químicas: inspeccionar el backsheet y los conectores. Si hay contaminación visible, reclasificar el módulo y notificar al gestor RAEE.
Temperatura excesiva (área metálica sin ventilación)	Aceleración de la degradación del encapsulante EVA. Riesgo de delaminación progresiva en módulos Clase B. En módulos Clase C, riesgo de liberación de compuestos del laminado dañado.	Ventilar el área o trasladar los módulos a una zona con temperatura < 50 °C. Si el almacenamiento supera 72 h: medir la temperatura del área en horario de mayor calor.	Si se detecta delaminación nueva o aumento de ampollas en un módulo Clase A, reclasificar a Clase B y acortar el plazo máximo de almacenamiento.

Nota. Elaborada con base en Bošnjaković et al. (2023), Li et al. (2024), Mahmoudi et al. (2021) e IEA-PVPS (2021). La reclasificación del módulo durante el almacenamiento debe registrarse en el formulario de **Tabla 40.** Lista de verificación previa al uso del área de acopio para almacenamiento temporal de módulos fotovoltaicos

☐	Criterio de verificación del área de acopio
☐	El área cuenta con cubierta impermeable en buen estado que impide el ingreso de lluvia directa sobre los módulos.
☐	Los módulos están elevados del suelo sobre pallets u otra superficie a ≥ 10 cm del nivel del piso. Ningún módulo tiene contacto directo con tierra, arena o superficie húmeda.
☐	El área está cerrada o delimitada con barrera física que impide el ingreso de roedores, aves e insectos.
☐	Los módulos FV están físicamente segregados de otros materiales, herramientas y productos químicos almacenados en el mismo espacio.
☐	La temperatura del área no supera 50 °C en el horario de mayor calor del día.
☐	Los módulos Clase C están almacenados en contenedor cerrado herméticamente, separados de los módulos Clase A y B.
☐	Cada pallet está identificado con el código de trazabilidad, la clase de los módulos y la fecha de ingreso al área de acopio.
☐	El plazo de almacenamiento no ha superado el máximo establecido para la clase correspondiente (A: 30 días / B: 15 días / C: 7 días).
☐	Se realizó una inspección visual de todos los módulos al ingresar al área y se registró en el formulario de trazabilidad.

Nota. Todos los criterios marcados como no conformes deben ser corregidos antes de ingresar los módulos al área. Si el criterio 1, 2 o 3 no puede garantizarse, el almacenamiento temporal no está autorizado.

Responsable del área de acopio: Nombre: _____ Firma: _____ Fecha de ingreso de módulos: _____	Resultado de la verificación: ☐ Todos los criterios conformes — AUTORIZADO ☐ Uno o más criterios no conformes Acción: _____
---	---

6.1. Almacenamiento temporal en Zonas No Interconectadas — carácter obligatorio y requerimientos mínimos de infraestructura

A diferencia del almacenamiento temporal condicional descrito en la sección anterior para proyectos convencionales, en las Zonas No Interconectadas (ZNI) el almacenamiento temporal en la comunidad o en el punto de retiro tiene carácter OBLIGATORIO. Las restricciones de acceso, la dependencia de logística multimodal, la necesidad de consolidar volumen mínimo

para la operación de transporte y la ausencia de gestores RAEE en las proximidades hacen que el almacenamiento temporal sea un eslabón estructural — y no excepcional — del proceso de gestión de residuos fotovoltaicos en estos territorios.

El reconocimiento del almacenamiento temporal como obligatorio en ZNI implica que la planificación de la infraestructura de acopio debe realizarse antes del inicio del proceso de retiro y no como contingencia posterior. El operador AOM, en coordinación con la entidad financiadora (IPSE, municipio o FNCE),

debe verificar que el área de acopio cumpla con los requisitos mínimos de infraestructura descritos en la siguiente

tabla antes de proceder con el retiro de los módulos.

📄 Diferencia clave entre almacenamiento condicional (sección 2.6) y obligatorio (ZNI): Sección 2.6 (contexto convencional): el almacenamiento temporal se activa SOLO cuando no es posible trasladar los módulos de forma inmediata. Es la excepción. — Sección 2.6.A (ZNI): el almacenamiento temporal ES PARTE DEL PROCESO y debe planificarse desde el inicio. Es la regla. Los plazos máximos son más amplios porque las restricciones logísticas son estructurales, no circunstanciales.

Tabla 41. Requerimientos mínimos de infraestructura para el almacenamiento temporal obligatorio en ZNI

Condición requerida	Especificación mínima — contexto ZNI	Orientación operativa para operadores AOM
Cubierta impermeable permanente	Estructura techada sólida (lámina de zinc, teja, cubierta de concreto) que proteja los módulos de lluvia directa, radiación solar y variaciones bruscas de temperatura. En ZNI tropical húmedo: la cubierta es el requisito más crítico.	No autorizar el almacenamiento temporal si no existe cubierta. En ausencia de bodega: construir estructura temporal con postes y lona de PVC $\geq 200 \mu\text{m}$ antes de iniciar el retiro. Esta inversión es responsabilidad del operador AOM e imputable al contrato de gestión de residuos.
Aislamiento del suelo elevado ($\geq 15 \text{ cm}$)	En ZNI con pisos de tierra, el nivel freático puede estar muy superficial en épocas de lluvias. Se requiere plataforma de madera, pallets de plástico o estructura metálica que eleve los módulos al menos 15 cm del suelo.	Los pallets de madera son más susceptibles a pudrición en climas muy húmedos. Preferir pallets de plástico HDPE o plataformas metálicas en contextos de humedad extrema (Pacífico, Amazonía). Si solo hay pallets de madera: inspeccionarlos cada 30 días.
Control de fauna reforzado	En ZNI, la presencia de roedores, serpientes, insectos y fauna silvestre en las áreas de almacenamiento es mucho más frecuente que en zonas urbanas. El cable DC y los conectores MC4 son especialmente vulnerables a mordeduras de roedores.	Estructura de almacenamiento cerrada con malla metálica de abertura $\leq 1 \text{ cm}$. Sellar todas las aberturas, grietas y huecos antes de ingresar módulos. Inspección semanal obligatoria del estado del embalaje de cada módulo almacenado.
Protección contra salinidad ambiental (zonas costeras e insulares)	En comunidades costeras (Costa Atlántica, Pacífico, San Andrés, Providencia), la brisa marina con aerosol salino acelera la corrosión del marco de aluminio y los conectores MC4, incluso dentro de un área cubierta.	Embalaje individual hermético de cada módulo (bolsa PE + caja) durante todo el período de almacenamiento. No almacenar módulos sin embalaje en zonas costeras aunque estén bajo cubierta. Priorizar el traslado en máximo 30 días en estas zonas.
Duración máxima diferenciada para ZNI	En ZNI, el almacenamiento temporal puede ser necesariamente más prolongado por las restricciones logísticas. Se reconoce esta realidad y se establecen plazos máximos diferenciados con inspecciones periódicas.	Módulos Clase A: hasta 90 días con inspección mensual. Módulos Clase B: hasta 45 días con inspección quincenal. Módulos Clase C: hasta 15 días; gestión prioritaria. Si se supera el plazo: reportar al IPSE/entidad financiadora y documentar en el formulario de trazabilidad con justificación y plan de traslado.
Coordinación anticipada con el gestor RAEE regional	Dado que en ZNI el almacenamiento puede extenderse semanas o meses, el operador AOM debe iniciar el proceso de	El operador AOM debe contactar al gestor RAEE receptor y acordar la ruta de traslado con al menos 30 días de anticipación al

Condición requerida	Especificación mínima — contexto ZNI	Orientación operativa para operadores AOM
	identificación del gestor RAEE receptor antes de proceder con el retiro del módulo.	retiro en contextos de difícil acceso. La entidad financiadora (IPSE, municipio) debe incluir esta gestión como obligación en el contrato de AOM.

Nota. Requerimientos elaborados con base en las condiciones climáticas de las principales regiones ZNI colombianas (IDEAM, 2015), el Decreto 4741 de 2005 (almacenamiento de RESPEL), la Política Nacional RAEE (MADS, 2015) y las experiencias de logística de equipos en ZNI reportadas por el IPSE. Los plazos máximos diferenciados para ZNI reconocen las restricciones logísticas estructurales sin comprometer la obligación de gestión adecuada de los residuos.

⊘ Prohibición expresa — abandono de módulos en comunidades ZNI: El abandono de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil en comunidades ZNI, sin embalaje adecuado, sin trazabilidad y sin gestión posterior, constituye una infracción ambiental sancionable conforme al Decreto 4741 de 2005 y la Ley 1333 de 2009. La baja viabilidad logística del transporte no es una justificación admisible ante la autoridad ambiental. El operador AOM, la entidad financiadora y el instalador original tienen responsabilidad solidaria en la gestión adecuada de los residuos FV en los territorios que operan.

7. Salida de la fase

Al finalizar la fase 2 los módulos deben encontrarse correctamente embalados, asegurados para transporte y clasificados según su condición estructural y una vez cumplidas estas condiciones, los módulos quedan listos para ingresar a la siguiente etapa del proceso. Posteriormente, los módulos pueden pasar a la FASE 3 – Pretratamiento, donde se realizará la remoción de cables, conectores y cajas de conexiones con el fin de preparar el panel para las etapas de desensamble y recuperación de materiales.

Marco normativo aplicable: El transporte y almacenamiento temporal de módulos retirados debe realizarse conforme al Decreto 1076 de 2015 y al Decreto 4741 de 2005 cuando los módulos presenten características de peligrosidad. En ausencia de regulación específica para residuos fotovoltaicos, se recomienda aplicar los criterios establecidos para la gestión RAEE como marco operativo de referencia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 42. Indicadores cumplimiento fase 2

Indicadores de cumplimiento	
☐	Los módulos fueron embalados en pallets con separadores entre paneles, evitando contacto directo entre superficies.
☐	El tipo de embalaje aplicado corresponde a la clasificación (A, B o C) asignada en la Fase
☐	Los módulos fueron transportados en posición vertical o con inclinación controlada durante el traslado.

Indicadores de cumplimiento	
☐	Los pallets fueron asegurados con correas o cintas de sujeción dentro del vehículo de transporte
☐	En caso de almacenamiento temporal, los módulos fueron colocados sobre pallets en área protegida, sin contacto directo con el suelo.
☐	Se verificó el pronóstico meteorológico del IDEAM para la ruta de transporte antes del despacho. El vehículo seleccionado cuenta con cobertura impermeable adecuada para las condiciones climáticas previstas en la zona de origen y destino. Si la ruta atraviesa zonas de alta precipitación, se utilizó cartón laminado o foam (no cartón estándar) como separador entre módulos, y se aplicó film estirable en mínimo 6 capas sobre el pallet completo.

Nota. Elaboración propia.

FASE 3. PRETRATAMIENTO DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO (REMOCIÓN DE CABLES, CONECTORES Y CAJA DE CONEXIONES)

1. Objetivo de la fase

El pretratamiento del módulo corresponde al conjunto de operaciones iniciales realizadas sobre los módulos fotovoltaicos retirados antes de su desensamble estructural retirando los componentes eléctricos externos del módulo con el propósito de preparar el panel para las etapas posteriores de separación y recuperación de materiales. De esta forma es relevante mencionar que en módulos fotovoltaicos basados en silicio cristalino, el pretratamiento se centra principalmente en la remoción de cables de salida, conectores y la caja de

conexiones (junction box). La eliminación de estos componentes facilita los procesos posteriores de desensamble del módulo y mejora la eficiencia de las etapas de reciclaje y recuperación de materiales (Ansanelli et al., 2021; Mao et al., 2024; Deng et al., 2022).

2. Preparación del área de trabajo

El pretratamiento debe realizarse en un área acondicionada que permita manipular los módulos de forma segura y controlada, respetando normas de ergonomía y seguridad industrial. A continuación se dimensionan y especifican cada uno de los cinco elementos que debe contemplar el área de pretratamiento, con los valores mínimos requeridos y los criterios de verificación antes de iniciar la jornada.

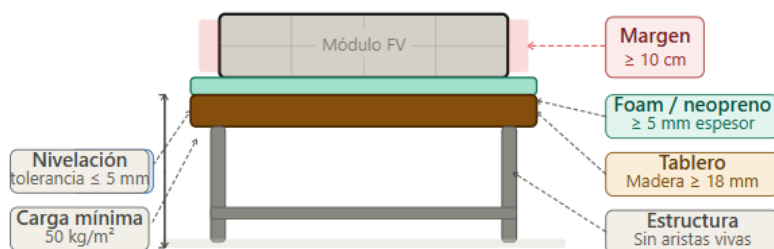
Tabla 43. Criterios de cumplimiento área de pretratamiento fase 3

 Instrucción: Verificar el cumplimiento de todos los criterios de esta sección ANTES de colocar el primer módulo sobre la mesa de trabajo. Usar la lista de verificación al final de este numeral.
① Superficie de trabajo plana y estable

Dimensiones mínimas	Módulo estándar (60–72 celdas): 1,90 m × 1,10 m (incluye 10 cm de margen perimetral) Módulo half-cut / bifacial: 2,20 m × 1,30 m Módulo de gran formato (≥ 400 Wp): 2,60 m × 1,40 m Altura de la mesa de trabajo: 0,85 m – 0,95 m (rango ergonómico para trabajo de pie)																				
Características técnicas	• Superficie plana con tolerancia de nivelación ≤ 5 mm en toda la longitud. • Material: madera contrachapada ≥ 18 mm, acero o aluminio perfilado. • Capacidad de carga mínima: 50 kg/m² (un módulo estándar pesa entre 18 y 25 kg). • Bordes sin aristas vivas ni clavos expuestos que puedan rayar el marco o el vidrio. • Superficie cubierta con foam o neopreno ≥ 5 mm de espesor para acolchamiento.																				
Área total del puesto de trabajo	El puesto de pretratamiento debe contemplar no solo la mesa de trabajo sino el espacio de maniobra del operario y los contenedores laterales. La siguiente tabla resume las dimensiones totales recomendadas según la escala de operación: <table><tr><th>Escala de operación</th><th>Área total mínima</th><th>Altura libre mínima</th><th>Observación</th></tr><tr><td>Unitaria (1–2 módulos/día)</td><td>4 m²</td><td>2,20 m</td><td>Mesa simple + área de maniobra del operario</td></tr><tr><td>Pequeña (hasta 10 módulos/día)</td><td>8 m²</td><td>2,50 m</td><td>Mesa + zona de acopio + contenedores laterales</td></tr><tr><td>Mediana (10–30 módulos/día)</td><td>15 m²</td><td>2,80 m</td><td>Dos puestos de trabajo + zona de segregación</td></tr><tr><td>Grande (> 30 módulos/día)</td><td>30 m²</td><td>3,00 m</td><td>Línea de pretratamiento + sistemas de ventilación</td></tr></table>	Escala de operación	Área total mínima	Altura libre mínima	Observación	Unitaria (1–2 módulos/día)	4 m²	2,20 m	Mesa simple + área de maniobra del operario	Pequeña (hasta 10 módulos/día)	8 m²	2,50 m	Mesa + zona de acopio + contenedores laterales	Mediana (10–30 módulos/día)	15 m²	2,80 m	Dos puestos de trabajo + zona de segregación	Grande (> 30 módulos/día)	30 m²	3,00 m	Línea de pretratamiento + sistemas de ventilación
Escala de operación	Área total mínima	Altura libre mínima	Observación																		
Unitaria (1–2 módulos/día)	4 m²	2,20 m	Mesa simple + área de maniobra del operario																		
Pequeña (hasta 10 módulos/día)	8 m²	2,50 m	Mesa + zona de acopio + contenedores laterales																		
Mediana (10–30 módulos/día)	15 m²	2,80 m	Dos puestos de trabajo + zona de segregación																		
Grande (> 30 módulos/día)	30 m²	3,00 m	Línea de pretratamiento + sistemas de ventilación																		
Criterio de aceptación	El módulo debe caber completamente sobre la superficie con al menos 10 cm de margen libre en cada borde. La mesa no debe tambalear al ejercer una carga lateral de 10 kg en cualquier punto del borde.																				

① Superficie de trabajo plana y estable

Dimensiones, características técnicas y criterios de aceptación



Tipo de módulo	Dimensión mínima de mesa	Altura
Estándar (60–72 celdas)	1,90 m × 1,10 m	0,85–0,95 m
Half-cut / bifacial	2,20 m × 1,30 m	0,85–0,95 m
Gran formato (≥ 400 Wp)	2,60 m × 1,40 m	0,85–0,95 m

Criterio de aceptación

El módulo cabe sobre la superficie con ≥ 10 cm de margen libre en cada borde.
La mesa no tambalea al ejercer carga lateral de 10 kg en cualquier punto del borde.

② Iluminación del área de pretratamiento

Niveles mínimos de iluminancia

Según la Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo de Colombia (Estatuto de Seguridad Industrial) y la norma ISO 8995-1:2002 (CIE S 008):

Área general del taller (zona de tránsito): 200 lux mínimo

Mesa de trabajo / zona de pretratamiento: 500 lux mínimo (recomendado: 750 lux)

Inspección visual detallada (fisuras, marcas): 1.000 lux mínimo

Temperatura de color recomendada: 4.000 K – 6.500 K (luz blanca neutra o fría)

Índice de reproducción cromática (IRC): ≥ 80 (para detectar colores de marcas térmicas)

Tipo de luminaria recomendada

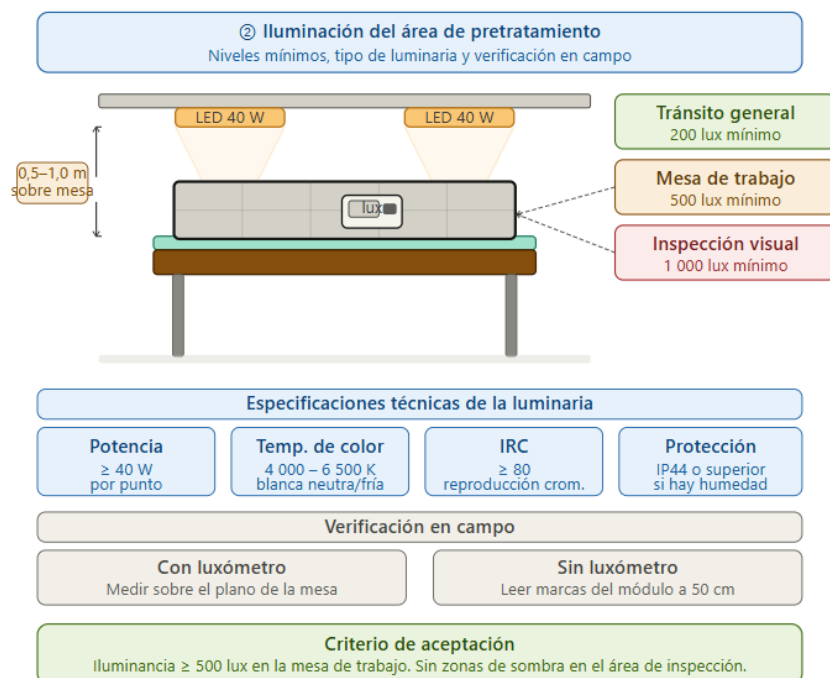
- Luminaria LED industrial tipo panel o regleta; potencia ≥ 40 W por punto de luz.
- Altura de instalación: 0,5 m – 1,0 m sobre el plano de la mesa (luminaria sobre la zona de trabajo).
- Mínimo 2 puntos de luz por puesto de trabajo para evitar sombras en la inspección visual.
- Luminaria con protección IP44 o superior si el área puede tener humedad (aspersión, lluvias).

Verificación en campo

- Medir la iluminancia con luxómetro sobre el plano de la mesa antes de iniciar la jornada.
- Si no hay luxómetro: verificar que se puedan leer claramente las marcas del módulo (serie, potencia) a 50 cm de distancia sin dificultad.
- Reemplazar luminarias cuando el nivel medido caiga por debajo del 80 % del valor inicial.

Criterio de aceptación

Nivel de iluminancia ≥ 500 lux en la superficie de la mesa de trabajo, medido con luxómetro. Sin zonas de sombra en el área de inspección del módulo.



③ Contenedores para segregación de materiales

Se requieren al menos 5 contenedores diferenciados, uno por fracción de material generada durante el pretratamiento:

N.º	Fracción Material /	Tipo de contenedor	Volumen mínimo	Color / etiqueta
1	Cables DC y conectores MC4	Bolsa plástica o caja de cartón	20 L	Naranja / COBRE PARA RECICLAJE
2	Junction box (carcasa + diodos)	Contenedor RAEE etiquetado	30 L	Amarillo / RAEE — COMPONENTES ELÉCTRICOS
3	Tornillos y elementos metálicos	Bandeja o recipiente metálico	5 L	Gris / METALES VARIOS
4	Residuos de adhesivo / sellante	Bolsa de residuos no reciclables	10 L	Negro / RESIDUOS NO APROVECHABLES
5	Fragmentos de vidrio (Clase C)	Contenedor rígido cerrado con tapa	50 L	Rojo / PELIGROSO — VIDRIO ROTO

Número mínimo de contenedores

Ubicación en el área

- Colocar los contenedores a $\leq 1,5$ m del puesto de trabajo para minimizar desplazamientos.
- Nunca colocar contenedores debajo de la mesa de trabajo: dificultan la maniobra del operario.
- El contenedor de fragmentos de vidrio (rojo) debe estar sobre superficie estable y con tapa disponible en todo momento.
- Etiquetar claramente cada contenedor con nombre de la fracción, clase de residuo y gestor RAEE receptor.

Criterio de aceptación

Los 5 contenedores están presentes, diferenciados por color o etiqueta, ubicados a $\leq 1,5$ m de la mesa de trabajo y con capacidad suficiente para el lote a procesar (≥ 50 % de capacidad libre al inicio de la jornada).

③ Contenedores para segregación de materiales

Mínimo 5 contenedores diferenciados — uno por fracción generada en el pretratamiento

N.º	Fracción / Material	Tipo de contenedor	Volumen	Color / etiqueta
1	Cables DC y conectores MC4	Bolsa plástica o caja de cartón	20 L	Naranja COBRE RECICLAJE
2	Junction box (carcasa + diodos)	Contenedor RAEE etiquetado	30 L	Amarillo RAEE ELECTRICO
3	Tornillos y elementos metálicos	Bandeja o recipiente metálico	5 L	Gris METALES VARIOS
4	Residuos de adhesivo / sellante	Bolsa residuos no reciclables	10 L	Negro RESIDUOS NO REICLABLES
5	Fragmentos de vidrio (Clase C)	Contenedor rígido cerrado con tapa	50 L	Rojo PELIGROSO

Reglas de ubicación en el área de trabajo

Distancia máxima al puesto

≤ 1,5 m del operario en todo momento

Nunca debajo de la mesa

Dificulta la maniobra del operario

Contenedor rojo (Clase C)

Superficie estable y tapa siempre disponible

Etiquetado obligatorio

Fracción, clase de residuo y gestor RAEE

Criterio de aceptación

Los 5 contenedores presentes, diferenciados por color/etiqueta, ubicados a ≤ 1,5 m y con capacidad ≥ 50 % libre al inicio de la jornada.

Nota. Elaboración propia con base en Decreto 4741 de 2005, Política Nacional RAEE (MADS, 2017), Resolución 2400 de 1979, ISO 8995-1:2002 y la Resolución 0312 de 2019

3. Remoción de cables y conectores

Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino incorporan cables de salida de corriente continua (DC) con aislamiento resistente a UV y condiciones climáticas exteriores, que terminan en conectores estandarizados tipo MC4. Antes de iniciar el pretratamiento, el responsable debe verificar la disponibilidad de todos los equipos e instrumentos listados en las tablas siguientes.

⚠ Requisito previo obligatorio: Verificar NUEVAMENTE la ausencia de tensión DC en el módulo (multímetro, lectura = 0 V) ANTES de tocar cualquier cable o conector, aunque el módulo ya haya sido inspeccionado en fases anteriores. Esta verificación es obligatoria en cada módulo individual.

Equipos e instrumentos requeridos por categoría

Tabla 44. Instrumentos de medición y verificación eléctrica

A. Instrumentos de medición y verificación eléctrica			
Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Multímetro digital o detector de tensión DC	Rango DC 0–1000 V; categoría de medida CAT III o superior (IEC 61010-1)	OBLIGATORIO	Verificar ausencia de tensión en los terminales del módulo ANTES de tocar cualquier cable o conector
Puntas de prueba aisladas	Aislamiento 1000 V; incluidas con el multímetro o equivalentes	OBLIGATORIO	Contacto con los terminales (+) y (–) para la lectura de tensión DC

A. Instrumentos de medición y verificación eléctrica

Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Detector de tensión sin contacto (clamp DC)	Rango 12–1000 V DC; indicación visual y sonora	RECOMENDADO	Verificación rápida de presencia de tensión sin contacto directo; complementa el multímetro

Nota. Elaboración propia con base en las recomendaciones técnicas de Gahlot et al. (2022) y Bošnjaković et al. (2023).

Tabla 45. Herramientas para desconexión de conectores MC4

B. Herramientas para desconexión de conectores MC4

Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Herramienta de desbloqueo MC4 (MC4 unlocking tool)	Compatible con la marca de conector del módulo (Stäubli, Amphenol, Weidmüller u otros)	OBLIGATORIO	Presionar las lengüetas de bloqueo del conector MC4 para separarlo sin dañar la carcasa ni el cable
Llave de montaje MC4 (MC4 spanners)	Par de llaves hexagonales para apriete/desapriete del cuerpo del conector	SEGÚN APLIQUE	Requerida si los conectores fueron instalados con par de apriete y no se desbloquean con la herramienta estándar
Destornillador de punta plana (pequeño)	Hoja 3–4 mm; mango aislado 1000 V	SEGÚN APLIQUE	Acceso a conectores de marcas que requieren palanca lateral en lugar de herramienta MC4 dedicada

Nota. Elaboración propia con base en las recomendaciones técnicas de Gahlot et al. (2022) y Bošnjaković et al. (2023).

Tabla 46. Herramientas de corte para conductores DC

C. Herramientas de corte para conductores DC

Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Pinzas de corte lateral aisladas	Aislamiento 1000 V; IEC 60900 / VDE 0682; capacidad de corte $\geq 6 \text{ mm}^2$	OBLIGATORIO	Corte controlado y limpio del conductor DC a ras del backsheet del módulo; evita tracciones bruscas
Cuchilla de precisión o bisturí industrial	Hoja reemplazable; mango antideslizante	SEGÚN APLIQUE	Retirar el adhesivo o sellante que fija el cable al backsheet cuando el cable no cede al corte directo
Pelacables con de regulación profundidad	Capacidad para secciones de $2,5 \text{ mm}^2$ a 6 mm^2 (secciones típicas cables FV)	RECOMENDADO	Pelar el aislamiento en el extremo cortado para clasificar y etiquetar correctamente el conductor (cobre visible)

Nota. Elaboración propia con base en las recomendaciones técnicas de Gahlot et al. (2022) y Bošnjaković et al. (2023).

Tabla 47. Herramientas de sujeción, soporte y organización

D. Herramientas de sujeción, soporte y organización			
Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Alicates de punta fina aislados	Aislamiento 1000 V; longitud ≥ 160 mm	RECOMENDADO	Sujetar el cable durante el corte para controlar la dirección y evitar rebotes; también para doblar extremos
Bridas plásticas / cinta aislante 1000 V	Cinta de vinilo; tensión de ruptura ≥ 1000 V; ancho ≥ 19 mm	OBLIGATORIO	Proteger y asegurar los extremos de los cables cortados para evitar contacto eléctrico accidental
Etiquetas adhesivas resistentes a la intemperie	Material: polipropileno o vinilo; adhesivo permanente	OBLIGATORIO	Identificar y clasificar los cables por tipo (positivo/negativo, extensión, sección) antes de depositarlos en el contenedor
Recipiente / bolsa para cables retirados	Capacidad ≥ 20 L; etiqueta 'COBRE PARA RECICLAJE'	OBLIGATORIO	Segregar los conductores retirados para su valorización como residuo metálico (recuperación de cobre)

Nota. Elaboración propia con base en las recomendaciones técnicas de Gahlot et al. (2022) y Bošnjaković et al. (2023).

Tabla 48. Elementos de protección personal (EPP) — remoción de cables

E. Elementos de protección personal (EPP) — remoción de cables			
Herramienta / Instrumento	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Guantes dieléctricos clase 00 o clase 0	ASTM D120 / IEC 60903; tensión máxima de uso: 500 V (clase 00) o 1000 V (clase 0)	OBLIGATORIO	Protección eléctrica durante la verificación de tensión y el manejo de conectores o conductores expuestos
Guantes de protección mecánica nivel B/C (sobre los dieléctricos)	ISO 13997 nivel B o C; cuero o fibra de aramida	OBLIGATORIO	Protección contra cortes en los bordes de los conductores al realizar el pelado o corte del cable
Gafas de seguridad	Polycarbonato; protección lateral; ANSI Z87.1 o equivalente	OBLIGATORIO	Proteger ojos de partículas y arcos eléctricos en caso de tensión residual no detectada

E. Elementos de protección personal (EPP) — remoción de cables

Herramienta Instrumento	/	Especificación técnica mínima	Carácter	Uso específico en la remoción
Calzado de seguridad dieléctrico		NTC 2396; clase dieléctrica; suela antideslizante	OBLIGATORIO	Protección eléctrica y mecánica en el área de pretratamiento
Mascarilla N95		Filtración ≥ 95 % partículas $\geq 0,3 \mu\text{m}$; NIOSH	OBLIGATORIO Clase C	Protección en módulos Clase C con backsheet perforado o celdas expuestas

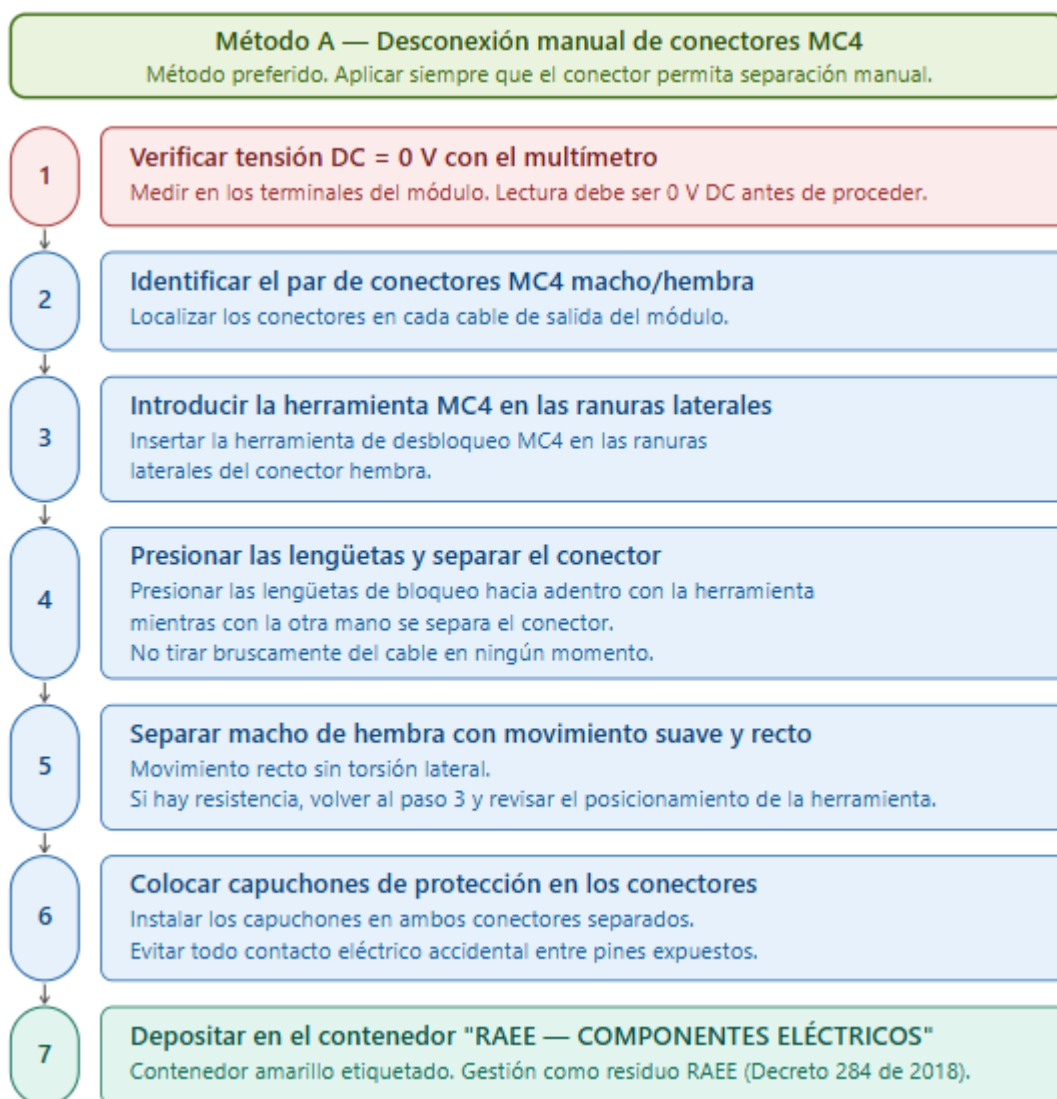
Nota. Elaboración propia con base en los estándares IEC 60900 (herramientas aisladas), IEC 61010-1 (instrumentos de medida), IEC 60903 (guantes dieléctricos) y las recomendaciones técnicas de Gahlot et al. (2022) y Bošnjaković et al. (2023).

Procedimiento de remoción (paso a paso)

La remoción puede realizarse por dos métodos según el estado de los conectores:

Método A — Desconexión manual de conectores MC4 (preferido)

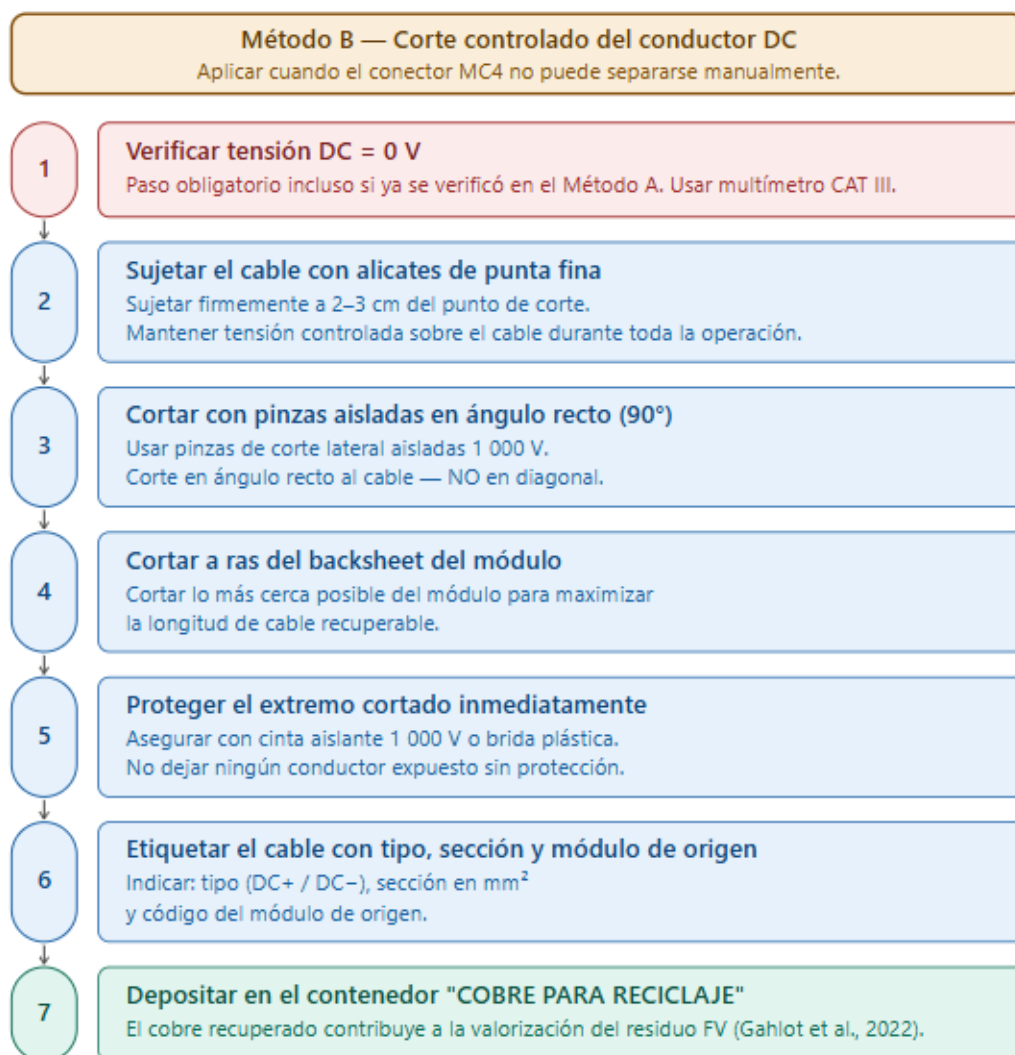
Figura 12. Metodo A - Desconexión manual de conectores MC4 (preferido)



Nota. Elaboración propia con base en IEC 60900 y Bošnjaković et al. (2023).

Método B — Corte controlado del conductor (cuando el conector no puede separarse manualmente)

Figura 13. Método B — Corte controlado del conductor (cuando el conector no puede separarse manualmente)



Nota. Elaboración propia con base en IEC 60900 y Gahlot et al. (2022).

1 Nota de valorización: Los cables DC retirados contienen principalmente cobre (sección típica 4–6 mm²). Segregarlos correctamente permite su recuperación como residuo metálico valioso. Mantener separados los cables DC+ y DC– para facilitar la clasificación por el gestor RAEE (Gahlot et al., 2022).

Lista de verificación previa al inicio de la remoción

Tabla 49. Lista de verificación previa al inicio de la remoción

☐	Criterio	¿Conforme?
☐	Multímetro calibrado y operativo — tensión DC verificada = 0 V en este módulo específico	☐ Sí ☐ No
☐	Herramienta de desbloqueo MC4 compatible con los conectores del módulo disponible	☐ Sí ☐ No
☐	Pinzas de corte lateral aisladas 1000 V disponibles y en buen estado	☐ Sí ☐ No
☐	Cinta aislante 1000 V y etiquetas adhesivas disponibles	☐ Sí ☐ No

☐	Criterio	¿Conforme?
☐	Contenedor 'COBRE PARA RECICLAJE' disponible con capacidad suficiente	☐ Sí ☐ No
☐	Contenedor 'RAEE — COMPONENTES ELÉCTRICOS' disponible para los conectores MC4	☐ Sí ☐ No
☐	Guantes dieléctricos + guantes mecánicos nivel B/C disponibles y en buen estado	☐ Sí ☐ No
☐	Gafas de seguridad y calzado dieléctrico puestos	☐ Sí ☐ No
☐	Mascarilla N95 disponible si el módulo es Clase C	☐ Sí ☐ No

Responsable: _____ Módulo N.º: _____ Fecha: _____

4. Remoción de la caja de conexiones (Junction Box)

Previamente a realizar la remoción de dicho elemento, es relevante mencionar que este componente cumple la función de concentrar las conexiones eléctricas provenientes de las celdas solares y permitir la salida de los conductores que conectan el módulo con el resto del sistema fotovoltaico; también conocida como junction box, es un componente que se encuentra ubicado en la parte posterior del módulo fotovoltaico y protege las conexiones eléctricas internas del panel. Previamente a su manipulación, se debe tener presente que la junction box contiene generalmente:

- Terminales eléctricos de conexión.
- Diodos de by-pass.
- Puntos de conexión de los cables de salida.

Usualmente, la caja se encuentra adherida a la superficie posterior del módulo mediante adhesivos estructurales o resinas epóxicas, por lo que su remoción requiere aplicar técnicas de desprendimiento mecánico controlado teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Realizar primero la apertura de la carcasa plástica para retirar los componentes internos.
- Posteriormente cortar el adhesivo que fija la caja al módulo.
- Finalmente, realizar el desprendimiento mecánico controlado de la carcasa.

Durante esta operación se debe evitar en todo momento aplicar fuerzas excesivas que puedan dañar la lámina posterior del módulo (backsheet) puesto que esto podría comprometer la integridad estructural del panel. De igual manera que en el paso anterior, los materiales retirados deben segregarse según su composición, diferenciando entre componentes electrónicos, conductores metálicos y materiales plásticos, para realizar una correcta disposición (Gahlot et al., 2022; Das & Sarmah, 2025).

5. Segregación inicial de materiales

Una vez retirados los cables y la caja de conexiones, los materiales extraídos deben clasificarse preliminarmente para facilitar su gestión posterior teniendo en cuenta que la segregación inicial puede realizarse considerando las siguientes categorías de materiales:

Tabla 50. Categorías para la clasificación durante la segregación de materiales.

Componente retirado	Material principal	Gestión recomendada
Cable DC	Cobre y polímeros	Recuperación de cobre mediante reciclaje de conductores
Conectores MC4	Plásticos y conductores metálicos	Separación manual
Junction box	Plástico y componentes electrónicos	Desensamble manual y separación de componentes electrónicos para reciclaje

Nota. Elaboración propia con base en Gahlot et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

La separación temprana de estos materiales facilita su posterior valorización dentro de procesos de reciclaje y contribuye a mejorar la eficiencia global del tratamiento de los módulos fotovoltaicos.

6. Verificación posterior al pretratamiento

Una vez sea completado el proceso de pretratamiento se debe verificar que el módulo se encuentre libre de componentes eléctricos externos, por lo que en esta etapa se debe confirmar que:

- Los cables de salida hayan sido retirados completamente.
- Los conectores hayan sido removidos.
- La caja de conexiones haya sido separada del módulo.
- No existan elementos externos adheridos al panel.

Una vez finalizada dicha verificación, el módulo queda compuesto principalmente por sus componentes estructurales los cuales son el insumo principal de la disposición. A continuación, el listado de cada uno de los componentes:

- Vidrio frontal.
- Celdas fotovoltaicas.

- Encapsulante polimérico.
- Lámina posterior (backsheet).
- Marco de aluminio

7. Salida de la fase

Una vez finalice el proceso total del pretratamiento del módulo fotovoltaico, el mismo debe encontrarse libre de cables, conectores y caja de conexiones, quedando así preparado para ingresar al proceso de desensamble estructural para posteriormente, pasar a la Fase 4 – Desensamble del módulo fotovoltaico, en donde se realizará la separación del marco de aluminio y la preparación del panel para los procesos de recuperación de materiales.

Marco normativo aplicable: El pretratamiento y la segregación de componentes eléctricos se rigen por el Decreto 284 de 2018, que reglamenta la gestión integral de los RAEE en Colombia. Los materiales segregados deben clasificarse como residuos aprovechables o peligrosos según el Decreto 4741 de 2005, tomando como referencia terminológica la NTC 2775 (ICONTEC, 2005) para la correcta identificación de los componentes fotovoltaicos.

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 51. Indicadores cumplimiento fase 3

Indicadores de cumplimiento	
☐	Los cables DC y conectores MC4 fueron retirados completamente antes del desensamble estructural.
☐	La caja de conexiones (junction box) fue separada del módulo mediante desprendimiento mecánico controlado, sin dañar el backsheet.
☐	Los materiales retirados fueron segregados según su composición: conductores metálicos, componentes electrónicos y materiales plásticos.
☐	El módulo quedó libre de todos los componentes eléctricos externos al finalizar la fase.

Nota. Elaboración propia

FASE 4. DESENSAMBLE DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO (SEPARACIÓN DEL MARCO Y PREPARACIÓN DEL MÓDULO PARA RECUPERACIÓN DE MATERIALES)

1. Objetivo de la fase

Durante la fase de desensamble se ejecutan todo el conjunto de operaciones mecánicas orientadas a separar los componentes estructurales principales del módulo fotovoltaico una vez que se han retirado los elementos eléctricos externos durante el pretratamiento teniendo como objetivo principal, el facilitar la recuperación de materiales con alto valor de reciclaje, especialmente aluminio y vidrio, los cuales representan la mayor proporción en masa dentro de los módulos fotovoltaicos basados en silicio cristalino. En sistemas fotovoltaicos convencionales, estos dos materiales pueden representar más del 80 % del peso total del panel, lo que convierte su

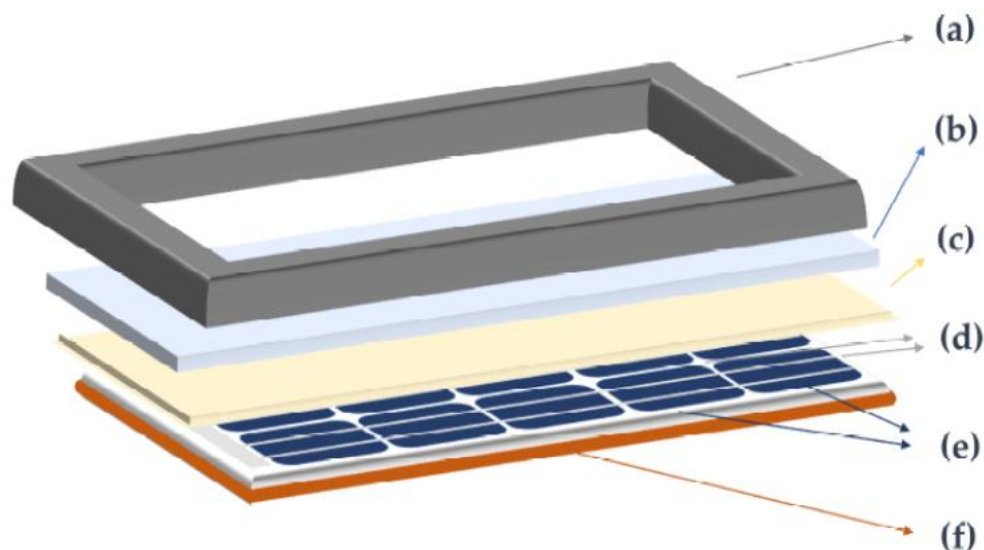
separación en una etapa clave dentro del proceso de valorización de residuos fotovoltaicos (Ansanelli et al., 2021; Mao et al., 2024; Deng et al., 2022).

Un desensamble adecuado del módulo permite mejorar la eficiencia de las etapas posteriores de reciclaje, reducir la contaminación cruzada entre materiales y aumentar el potencial de recuperación de recursos dentro de esquemas de economía circular aplicados al sector fotovoltaico.

2. Remoción del marco de aluminio

Como aspecto relevante es importante mencionar que los módulos fotovoltaicos comerciales incorporan un marco estructural de aluminio que rodea el perímetro del panel el cual cumple funciones de protección mecánica y soporte estructural dentro de los sistemas de montaje fotovoltaico.

Figura 14. Estructura de un módulo fotovoltaico con identificación del marco de aluminio.



Nota. Estructura típica de un módulo fotovoltaico: (a) marco de aluminio; (b) vidrio; (c) encapsulante EVA; (d) colectores de plata; (e) células de silicio; (f) lámina posterior (backsheet). Tomado de *Energies*, 17(23), 6015, por Díez-Suárez et al. (2024). <https://doi.org/10.3390/en17236015>. Licencia CC BY 4.0.

El marco generalmente está compuesto por perfiles de aluminio extruido, los cuales están unidos en las esquinas mediante sistemas de ensamblaje mecánico o mediante prensado estructural. Sin embargo, en algunos casos se utilizan elementos de fijación adicionales, como tornillos o adhesivos estructurales. La remoción del marco constituye una de las primeras operaciones dentro del desensamble del módulo, debido a que el aluminio presenta un alto valor de recuperación en el mercado de reciclaje de metales y puede separarse mediante procedimientos mecánicos relativamente simples (Lim et al., 2022; Deng et al., 2022), los cuales se mencionan a continuación:

- Desmontaje manual de las esquinas del marco.
- Corte de los perfiles de aluminio mediante herramientas mecánicas.

- Separación mecánica del marco respecto al vidrio frontal.

Para facilitar esta operación, se pueden emplear las siguientes herramientas:

- Sierras de corte industrial.
- Herramientas rotativas de corte.
- Dispositivos mecánicos de separación.

Durante dicho procedimiento se debe evitar aplicar esfuerzos excesivos sobre el vidrio del módulo puesto que el vidrio templado puede fracturarse si se generan concentraciones de tensión en los bordes del panel.

Por otra parte, es importante tener presente que el aluminio recuperado puede gestionarse posteriormente mediante procesos convencionales de reciclaje de metales, lo que permite su reintegración dentro de cadenas productivas industriales.

3. Separación del vidrio frontal

Una vez sea retirado el marco de aluminio, el módulo quedara compuesto por un laminado estructural formado por vidrio frontal, encapsulante polimérico (EVA), celdas fotovoltaicas y lámina posterior; el vidrio representa la fracción más significativa del peso total del módulo fotovoltaico, como ejemplo, en módulos de silicio cristalino convencionales, el vidrio puede representar aproximadamente entre el 65 % y el 75 % del peso total del panel (Lim et al., 2022; Diez-Suarez et al., 2024), por lo que es una parte del módulo que toma relevancia en el aprovechamiento de los residuos. De esta manera es que la recuperación eficiente del vidrio requiere procesos que permitan separar esta capa de las celdas y del encapsulante sin generar contaminación excesiva del

material y en este mismo sentido se debe tener muy presente que la fuerte adhesión generada por el encapsulante EVA durante el proceso de fabricación del módulo constituye uno de los principales desafíos técnicos para el reciclaje de paneles fotovoltaicos.

En la literatura científica se han identificado tres rutas tecnológicas principales para lograr esta separación de manera segura sin afectar el material: procesos mecánicos, procesos térmicos y procesos químicos, en donde cada uno de estos enfoques cuenta con diferentes niveles de complejidad tecnológica, consumo energético, eficiencia de recuperación y requerimientos de infraestructura (Ansanelli et al., 2021; Deng et al., 2022; Lim et al., 2022), por lo que es de vital importancia realizar un análisis correcto de la implementación de dichas tecnologías.

Tabla 52. Tecnologías utilizadas para la separación de materiales en módulos fotovoltaicos

Método	Principio del proceso	Ventajas	Limitaciones
Mecánico	Trituración o separación física de las capas del módulo	Menor inversión tecnológica y mayor simplicidad operativa	Menor pureza de los materiales recuperados respecto a métodos químicos y térmicos, con posible contaminación cruzada entre fracciones
Térmico	Delaminación mediante calentamiento para degradar el encapsulante	Alta eficiencia de recuperación de materiales	Alto consumo energético, requiere temperaturas entre 400 °C y 600 °C para degradar el encapsulante EVA
Químico	Disolución del encapsulante mediante reactivos químicos	Alta pureza de los materiales recuperados (silicio >99 % en procesos optimizados)	Uso de sustancias químicas y mayor complejidad operativa

Nota. Elaboración propia con base en Ansanelli et al. (2021), Mao et al. (2024), Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

4. Método recomendado para el contexto colombiano

La literatura científica identifica tres rutas tecnológicas para el tratamiento del laminado fotovoltaico: el desensamble mecánico, los procesos térmicos y los procesos químicos o hidrometalúrgicos.

Cada una de estas rutas presenta ventajas técnicas distintas en términos de pureza de los materiales recuperados y tasas de recuperación, pero difieren significativamente en sus requerimientos de infraestructura, inversión y escala mínima de operación (Ansanelli et al., 2021; Deng et al., 2022; Lim et al., 2022).

Definir un método recomendado para Colombia es necesario porque no todas las rutas son igualmente viables en el contexto actual del país. La elección del método tiene implicaciones directas sobre: (a) quién puede ejecutar el proceso — gestor RAEE existente o planta especializada nueva —; (b) cuánto

cuesta implementarlo; (c) qué fracciones de material se pueden recuperar; y (d) qué impacto ambiental genera el proceso mismo de reciclaje. Una guía técnica orientadora que no especifique el método aplicable en el país perdería su utilidad práctica para los gestores colombianos.

 **Premisa del análisis:** La viabilidad de un método de reciclaje FV no depende solo de su eficiencia técnica, sino de su ajuste a la infraestructura, capacidad de inversión y marco normativo del país donde se implementa. Un método técnicamente superior pero inviable localmente no puede ser recomendado como estándar operativo.

4.1. Descripción de los tres métodos disponibles

Tabla 53. Método 1 — Desensamble mecánico manual y semiautomático

Método 1 — Desensamble mecánico manual y semiautomático	
Principio del proceso	Separación física de los componentes del módulo mediante herramientas manuales o semiautomáticas: retiro del marco de aluminio, separación del vidrio frontal por corte perimetral, y trituración controlada del laminado para liberar las celdas y el encapsulante EVA.
Ventajas principales	• No requiere infraestructura de alta inversión — compatible con talleres RAEE existentes. • Genera fracciones de aluminio y vidrio de alta pureza, con mercados activos en Colombia. • Implementable a cualquier escala, desde unidades individuales hasta lotes industriales. • Impacto ambiental del proceso muy bajo — sin emisiones tóxicas ni residuos líquidos peligrosos. • Adaptable de forma progresiva a medida que crece el volumen de residuos FV en el país.
Limitaciones	• Recuperación de silicio puro limitada — el laminado triturado requiere procesos adicionales. • La plata y otros metales de alta pureza en las celdas no son recuperables por este método solo. • Requiere operarios entrenados y protocolos de seguridad para el manejo del vidrio triturado.
Infraestructura disponible en Colombia	Alta. Gestores RAEE autorizados, empresas de reciclaje de aluminio y vidrio, talleres de desensamble de RAEE convencionales ya operan en Colombia y pueden adaptar sus procesos para módulos FV con inversión moderada.
Viabilidad Colombia 2025	ALTA — Método viable en el corto plazo (2025–2030) ✓

Nota. Elaboración propia basada en Bošnjaković et al., 2023; Ansanelli et al., 2021; Li et al., 2024; Ganesan & Valderrama, 2022; IEA-PVPS, 2021

Tabla 54. Método 2 — Tratamiento térmico (pirólisis / combustión controlada)

Método 2 — Tratamiento térmico (pirólisis / combustión controlada)	
Principio del proceso	Descomposición del encapsulante EVA mediante calor controlado (temperaturas entre 400 °C y 600 °C) en hornos de pirólisis, lo que permite liberar el vidrio, las celdas y los metales conductores sin corte mecánico previo del laminado.
Ventajas principales	• Permite separar el laminado completo sin corte mecánico, preservando la integridad de las celdas. • Mayor recuperación potencial de silicio y metales de las celdas. • Proceso más automatizable en escala industrial.
Limitaciones	• Requiere hornos industriales de alta temperatura con sistema de captura de gases (COV, HF). • Genera emisiones gaseosas tóxicas si el sistema de captura falla o no está calibrado. • Inversión inicial alta — inviable para gestores RAEE medianos colombianos. • Requiere escala mínima de operación de cientos de módulos por ciclo para ser rentable. • No existe infraestructura disponible a escala industrial en Colombia a 2025.
Infraestructura disponible en Colombia	Muy baja. No existen plantas de pirólisis dedicadas a módulos FV en Colombia. Las plantas de co-procesamiento de la industria cementera podrían adaptarse parcialmente para fracciones poliméricas, pero no para el laminado completo.
Viabilidad Colombia 2025	BAJA — No viable en el corto plazo. Horizonte de implementación: 2030–2035
Marco normativo aplicable	Cualquier tratamiento térmico del laminado fotovoltaico (pirólisis, combustión controlada o valorización energética) que implique emisiones a la atmósfera debe cumplir con los límites establecidos en la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, la cual fija las normas y estándares de emisión admisibles para fuentes fijas. El gestor que ejecute este proceso debe contar con licencia ambiental vigente que incluya expresamente este tipo de tratamiento. La ausencia de licencia o el incumplimiento de los límites de emisión constituyen infracción ambiental sancionable conforme a la Ley 1333 de 2009.

Nota. Elaboración propia basada en Deng et al., 2022; Lim et al., 2022; Bošnjaković et al., 2023; Li et al., 2024; Ganesan & Valderrama, 2022; IEA-PVPS, 2021

Tabla 55. Método 3 — Procesos químicos / hidrometalúrgicos

Método 3 — Procesos químicos / hidrometalúrgicos	
Principio del proceso	Disolución selectiva de los componentes del laminado mediante ácidos, bases o solventes orgánicos que permiten recuperar silicio puro, plata, indio y otros metales de alta pureza de las celdas fotovoltaicas.
Ventajas principales	• Máxima recuperación de silicio de alta pureza, plata e indio — los metales de mayor valor. • Alta selectividad: permite recuperar fracciones que los métodos mecánico y térmico no alcanzan.

	• Potencialmente el método más eficiente en términos de masa total recuperada.
Limitaciones	• Requiere reactores y plantas químicas especializadas con manejo de ácidos concentrados. • Genera residuos líquidos peligrosos que requieren tratamiento adicional. • Inversión muy alta — solo viable a escala industrial con miles de módulos por año. • Requiere personal especializado en química industrial y licencias ambientales específicas. • Solo disponible en fase experimental o piloto en Colombia a 2025.
Infraestructura disponible en Colombia	Muy baja. Solo existen capacidades parciales en el sector minero-metalúrgico colombiano (recuperación de metales preciosos), pero no específicamente orientadas a módulos FV. Implementación a escala industrial requiere horizonte de largo plazo.
Viabilidad Colombia 2025	MUY BAJA — No viable en el corto ni mediano plazo. Horizonte: 2035+
Marco normativo aplicable	Los procesos de disolución selectiva mediante ácidos, bases o solventes orgánicos generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y efluentes líquidos peligrosos sujetos a regulación específica. El gestor que ejecute procesos hidrometalúrgicos sobre laminado fotovoltaico debe contar con: (a) licencia ambiental que incluya este tipo de tratamiento; (b) cumplimiento de los límites de emisiones de COV establecidos en la Resolución 909 de 2008; y (c) permiso de vertimientos que cumpla los parámetros de la Resolución 631 de 2015. Los residuos líquidos generados se clasifican como RESPEL conforme al Decreto 4741 de 2005 y deben gestionarse con gestor autorizado.

Nota. Elaboración propia basada en (Ansanelli et al., 2021; Mahmoudi et al., 2021; Deng et al., 2022; Li et al., 2024; Ganesan & Valderrama, 2022; Das & Sarmah, 2025)

Tabla 56. Tabla comparativa de los tres métodos

Criterio de evaluación	✓ Mecánico (recomendado)	Térmico / Pirólisis	Químico / Hidrometalúrgico
Inversión inicial en equipos	Baja — herramientas disponibles localmente	Alta — hornos industriales especializados	Muy alta — reactores y químicos especializados
Infraestructura requerida	Compatible con talleres RAEE y reciclaje existentes	Planta de pirólisis o horno controlado ($T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Planta química con manejo de ácidos / reactivos
Disponibilidad en Colombia (2025)	Alta — instalaciones existentes adaptables	Baja — no disponible a escala industrial	Muy baja — solo experimental en laboratorios
Fraciones recuperables	Aluminio, vidrio, cobre (alta pureza)	Silicio, metales (pureza variable)	Silicio puro, plata, metales (alta pureza)
Pureza del material recuperado	Alta (aluminio y vidrio sin contaminación cruzada)	Media (posible contaminación térmica del vidrio)	Alta (separación química selectiva)

Criterio de evaluación	✓ Mecánico (recomendado)	Térmico / Pirólisis	Químico / Hidrometalúrgico
Impacto ambiental del proceso	Bajo — sin emisiones tóxicas significativas	Medio-alto — COV, gases tóxicos, CO ₂	Alto — residuos líquidos peligrosos, ácidos
Costo operativo por módulo	Bajo	Medio-alto	Alto
Escala mínima económica	Desde unidades individuales	Requiere volúmenes mínimos (lotes ≥ 500 módulos)	Requiere escala industrial (miles de módulos)
Marco normativo aplicable (Col.)	Decreto 4741/2005 y normativa RAEE vigente	Requiere licencia ambiental específica	Requiere licencia ambiental específica
Tiempo de implementación	Corto plazo (< 6 meses con RAEE existente)	Largo plazo (> 24 meses para planta nueva)	Largo plazo (> 36 meses para planta nueva)

Nota. Elaboración propia con base en Ansaneli et al. (2021), Deng et al. (2022), Lim et al. (2022) y el diagnóstico de infraestructura de reciclaje en Colombia (UPME, 2025; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 57. Requisitos normativos para tratamientos térmicos y químicos de residuos fotovoltaicos en Colombia

Proceso / tratamiento	Instrumento ambiental requerido	Límites y condiciones — Resolución 909 de 2008	Autoridad competente
Pirólisis / combustión controlada del encapsulante EVA	Licencia ambiental (art. 49–50, Ley 99 de 1993) + autorización de emisiones atmosféricas	Resolución 909 de 2008: NO _x ≤ 250 mg/m ³ ; SO ₂ ≤ 500 mg/m ³ ; Material particulado ≤ 100 mg/m ³ . Sistema de captura de gases obligatorio.	Autoridad ambiental competente (ANLA o CAR según escala del proyecto)
Co-procesamiento en hornos cementeros	Licencia ambiental del horno cementero vigente + certificado de co-procesamiento	Resolución 909 de 2008 aplica a las emisiones del horno. El proveedor debe entregar certificado de destrucción del residuo.	ANLA. El generador debe conservar el certificado de co-procesamiento como evidencia.
Valorización energética de fracciones poliméricas (EVA / backsheet)	Licencia ambiental de la planta receptora vigente + comprobante de entrega	Resolución 909 de 2008. Las fracciones poliméricas de módulos FV pueden contener retardantes de llama halogenados; verificar compatibilidad con la planta receptora.	CAR o ANLA según capacidad instalada de la planta.
Procesos químicos / hidrometalúrgicos (ácidos, bases, solventes orgánicos)	Licencia ambiental + permiso de emisiones y vertimientos	Decreto 3930 de 2010 (vertimientos). Resolución 631 de 2015 (parámetros y valores de vertimientos). Resolución 909 de 2008 (emisiones de COV).	ANLA (proyectos de alto impacto). CAR para proyectos de menor escala.
Incineración de residuos peligrosos (RESPEL)	Licencia ambiental específica para	Resolución 909 de 2008: límites estrictos para	ANLA exclusivamente. No aplica para gestores

Proceso / tratamiento	Instrumento ambiental requerido	Límites y condiciones — Resolución 909 de 2008	Autoridad competente
	incineración de RESPEL (Decreto 4741 de 2005)	dioxinas, furanos, HCl, HF y metales pesados en gases de salida. Monitoreo continuo de emisiones obligatorio.	con licencia solo para RAEE convencional.

Nota. Elaborada con base en la Resolución 909 de 2008, el Decreto 4741 de 2005, la Resolución 631 de 2015, el Decreto 3930 de 2010 y la Ley 1333 de 2009.

4.2. Análisis del contexto colombiano: por qué el método mecánico es el recomendado

En la Fase 4 se presenta la ruta de evolución tecnológica propuesta para Colombia en tres horizontes temporales. El presente bloque amplía eso, incorporando las condiciones habilitantes, las rutas transitorias, las metas de recuperación por fracción y las acciones estructurales requeridas de cada actor del sistema, en línea con la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019) y los compromisos de transición energética de la Ley 2099 de 2021.

Tabla 58. Factores del contexto colombiano

Horizonte	Método predominante	Condiciones habilitantes y rutas transitorias	Fracciones objetivo y metas	Acciones estructurales y alineación estratégica
Corto plazo 2025–2030	Mecánico manual y semiautomático (herramientas de mano + trituradora pequeña cuando esté disponible)	Procedimientos manuales del Ajuste 3. Alianzas entre gestores. Almacenamiento transitorio certificado.	Aluminio (marco): ≥ 95 % Vidrio: ≥ 85 % Cobre (cables): ≥ 80 % Silicio: entrega a gestor RESPEL	- Adaptar talleres RAEE existentes con EPP, ventilación y área de segregación. - Capacitar operarios en manejo de RESPEL de módulos FV. - Establecer al menos 3 alianzas regionales entre gestores pequeños. - Reporte al MADS de necesidades de inversión en infraestructura. Alineación: Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019), Eje 2 (flujos de materiales).
Mediano plazo 2030–2035	Mecánico automatizado + térmico piloto (trituradoras industriales + separación magnética + hornos piloto de pirólisis)	Incorporación de trituradoras de industriales en plantas RAEE de mediana y gran escala. Pilotos de pirólisis con licencia ambiental (Res. 909 de 2008).	Aluminio: ≥ 97 % Vidrio: ≥ 90 % Cobre: ≥ 85 % Silicio (parcial): ≥ 10 % Polímeros: valorización energética	- Inversión en líneas semiautomáticas de trituración (USD 50 000–150 000/planta). - Desarrollo de estándares técnicos colombianos para equipos de reciclaje FV (ICONTEC). - Acceso a líneas de financiamiento verde (Bancóldex, GCF) para plantas RAEE especializadas.

Horizonte	Método predominante	Condiciones habilitantes y rutas transitorias	Fracciones objetivo y metas	Acciones estructurales y alineación estratégica
				Regulación específica para residuos fotovoltaicos (actualización Decreto 284 de 2018). Alineación: ENEC (MADS/MinCIT, 2019), Eje 5 (nuevos modelos de negocio circulares).
Largo plazo 2035+	Mecánico + térmico + químico / hidrometalúrgico (líneas industriales completas + recuperación de Si puro, Ag e In)	Plantas de reciclaje FV especializadas con capacidad para todas las fracciones. Mercado de silicio secundario activo en Colombia.	Todas las fracciones: ≥ 95 % en masa Plata: recuperación metalúrgica Silicio puro: reutilización industrial	- Desarrollo de clústeres industriales de reciclaje FV en zonas de alta generación (Atlántico, Cesar, La Guajira). - Integración con la cadena de valor de la industria solar colombiana (fabricantes, importadores, EPC). - Certificación de gestores FV bajo esquema nacional de evaluación de conformidad (ONAC). - Reporte de tasas de recuperación al MADS como indicador de economía circular del sector energético. Alineación: ENEC (MADS/MinCIT, 2019), Eje 1 (producción y consumo sostenible) + ODS 7, 12 y 13.

Nota. Elaborada con base en IEA-PVPS (2021), Ganesan & Valderrama (2022), Das & Sarmah (2025), la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019) y la Ley 2099 de 2021. Los horizontes son indicativos y dependen del crecimiento del volumen de residuos FV en Colombia y de las decisiones de política pública del MADS y del Ministerio de Minas y Energía.

4.3. Conclusión y alcance del método recomendado

✓ **Método recomendado para Colombia (2025–2030):** Desensamble mecánico manual y semiautomático, ejecutado por gestores RAEE autorizados con instalaciones adaptadas. Esta recomendación es válida para la etapa inicial de desarrollo del mercado de residuos FV en Colombia y debe revisarse a medida que el volumen de módulos al final de su vida útil crezca y la infraestructura especializada evolucione.

Esta recomendación no implica que los métodos térmico y químico sean descartables a largo plazo. Por el contrario, la adopción del método mecánico en el corto plazo permite: (a) construir capacidad operativa local con los gestores RAEE existentes; (b) generar información técnica y económica

real sobre el proceso en el contexto colombiano; (c) recuperar las fracciones de mayor volumen (aluminio, vidrio, cobre), que tienen mercados activos en Colombia; y (d) preparar el terreno regulatorio y de infraestructura para incorporar métodos de mayor complejidad en el mediano y largo plazo.

4.4. Ruta de evolución tecnológica recomendada para Colombia

Tabla 59. Ruta de evolución tecnológica recomendada para Colombia

Horizonte	Método predominante	Condición habilitante	Fracciones objetivo
Corto plazo (2025–2030)	✓ Mecánico manual y semiautomático	Adaptación de instalaciones RAEE existentes; capacitación de operarios	Aluminio (marco), vidrio, cobre (cables). Meta: ≥ 80 % en masa
Mediano plazo (2030–2035)	Mecánico automatizado + térmico piloto	Crecimiento del volumen de residuos FV; inversión en líneas semiautomáticas	Aluminio, vidrio, silicio (parcial), polímeros (valorización energética)
Largo plazo (2035+)	Mecánico + térmico + químico / hidrometalúrgico	Escala industrial; regulación específica FV; mercado de silicio secundario maduro	Todas las fracciones incluyendo silicio puro, plata, indio (meta: ≥ 95 % en masa)

Nota. Ruta de evolución tecnológica propuesta con base en los modelos de transición de países en etapa temprana de gestión de residuos FV (IEA-PVPS, 2021; Ganesan y Valderrama, 2022; Das y Sarmah, 2025). Los horizontes temporales son indicativos y dependen del crecimiento del volumen de residuos FV en Colombia.

5. Salida de la fase

Una vez finalice la fase de desensamble, el módulo fotovoltaico debe haber sido separado en sus principales componentes estructurales, por lo que en esta etapa deben haberse recuperado al menos los siguientes materiales:

- Marco de aluminio.
- Vidrio frontal.
- Laminado restante compuesto por celdas fotovoltaicas y encapsulante polimérico.

Estos materiales continúan hacia las etapas posteriores del proceso de

reciclaje, donde se realizarán operaciones adicionales orientadas a la recuperación de materiales presentes en las celdas fotovoltaicas.

Marco normativo aplicable: El desensamble de módulos se inscribe en el marco de la Ley 1715 de 2014, que establece la responsabilidad de los actores del sector frente al ciclo de vida de los equipos fotovoltaicos. Los materiales recuperados como lo son aluminio y vidrio deben gestionarse conforme a la GTC 24 (ICONTEC, 2009), que orienta la separación en la fuente y el manejo diferenciado de residuos con potencial de valorización.

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 60. Indicadores cumplimiento fase 4

Indicadores de cumplimiento	
☐	El marco de aluminio fue removido completamente sin generar fracturas en el vidrio frontal.
☐	El aluminio recuperado fue segregado y destinado a proceso de reciclaje de metales.

Indicadores de cumplimiento	
☐	La separación del vidrio frontal se realizó mediante proceso mecánico controlado.
☐	Los fragmentos de vidrio recuperados fueron separados del laminado restante mediante cribado mecánico.
☐	Al finalizar la fase se obtuvieron al menos tres fracciones diferenciadas: marco de aluminio, vidrio y laminado restante.

Nota. Elaboración propia.

FASE 5. TRATAMIENTO DEL LAMINADO FOTOVOLTAICO (RECUPERACIÓN DE MATERIALES PRESENTES EN CELDAS Y ENCAPSULANTE)

1. Objetivo de la fase

Una vez sean separados el marco de aluminio y el vidrio frontal durante las etapas previas del proceso de reciclaje, el material restante del módulo fotovoltaico corresponde principalmente al laminado fotovoltaico, el cual está compuesto por celdas de silicio, interconectores metálicos, encapsulante polimérico (EVA) y la lámina posterior del módulo (backsheet); de esta manera, el objetivo principal de esta fase es aplicar procesos que permitan liberar y recuperar los materiales presentes en este laminado, particularmente silicio y metales conductores, así como gestionar adecuadamente las fracciones poliméricas resultantes. Es de destacar que durante la última década estudios

recientes han señalado que el laminado fotovoltaico contiene materiales estratégicos cuya recuperación puede contribuir a mejorar la sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos, especialmente mediante la recuperación de metales y silicio que pueden reintegrarse en cadenas industriales de reciclaje (Ansanelli et al., 2021; Mao et al., 2024, Deng et al., 2022; Das & Sarmah, 2025).

Antes de describir los procedimientos de tratamiento del laminado, la presente fase reconoce la brecha de infraestructura que caracteriza el contexto colombiano actual. A 2025, la gran mayoría de gestores RAEE autorizados en Colombia no cuentan con los equipos industriales requeridos para el tratamiento eficiente del laminado fotovoltaico. Esta brecha no impide la implementación de la guía, sino que determina el tipo de procedimiento aplicable según la capacidad instalada de cada operador (Ganesan & Valderrama, 2022; IEA-PVPS, 2021).

Tabla 61. Diagnóstico de brechas de infraestructura para el tratamiento del laminado fotovoltaico en Colombia (2025)

Infraestructura / equipo	Disponibilidad actual en Colombia	Diagnóstico de la brecha	Indicador de inversión referencial
Trituradoras industriales de baja	Muy baja. Solo disponibles en pocas plantas de reciclaje	La mayoría de gestores RAEE trabajan con equipos de desmontaje	Inversión estimada: USD 15 000–50 000 por unidad.

Infraestructura / equipo	Disponibilidad actual en Colombia	Diagnóstico de la brecha	Indicador de inversión referencial
velocidad para RAEE	electrónico en Bogotá, Medellín y Cali.	manual. No existe línea específica para módulos FV.	Requiere espacio físico mínimo de 40 m².
Separadores magnéticos industriales (tambor / cinta)	Baja. Disponibles principalmente en plantas de recuperación de metales, no en gestores RAEE.	Los imanes de mano son la alternativa disponible en la gran mayoría de talleres RAEE colombianos.	Inversión estimada: USD 5 000–20 000. Compatible con talleres medianos.
Separadores por de corrientes Foucault	Muy baja. Solo disponibles en plantas de reciclaje de gran escala o en el sector minero-metalúrgico.	No existen instalaciones específicas para módulos FV. Horizonte de implementación: 2030–2035.	Inversión estimada: USD 30 000–80 000. Solo viable para plantas con > 500 módulos/mes.
Mesas densimétricas para separación Si/polímeros	Muy baja. No disponibles en gestores RAEE colombianos actuales.	La flotación en agua es la alternativa manual viable para pequeña escala.	Inversión estimada: USD 8 000–25 000. Requiere sistema de tratamiento de aguas residuales.
Sistemas de extracción y filtración de polvo certificados	Media-baja. Disponibles en talleres de carpintería metálica y soldadura, pero no certificados para RESPEL.	La mayoría de talleres RAEE no cuentan con extracción localizada certificada para polvo de celdas.	Inversión estimada: USD 3 000–10 000. Requisito previo para cualquier proceso de trituración de módulos FV.

Nota. Diagnóstico elaborado con base en Ganesan & Valderrama (2022), IEA-PVPS (2021), UPME (2025) y la Política Nacional RAEE (MADS, 2015). Los valores de inversión son estimaciones referenciales basadas en precios de mercado internacional; pueden variar según el proveedor y las condiciones de instalación en Colombia

2. Composición del laminado fotovoltaico

Posteriormente a realizar la separación del vidrio, la cual se ejecutó en la fase anterior, el laminado restante contiene varias fracciones de materiales adheridas entre sí. Se debe tener presente que las principales fracciones que están presentes en el laminado corresponden a:

- Celdas fotovoltaicas de silicio cristalino.

- Interconectores metálicos (principalmente cobre).
- Contactos metálicos finos (principalmente plata).
- Encapsulante EVA (etileno-acetato de vinilo).
- Lámina posterior del módulo (backsheet).

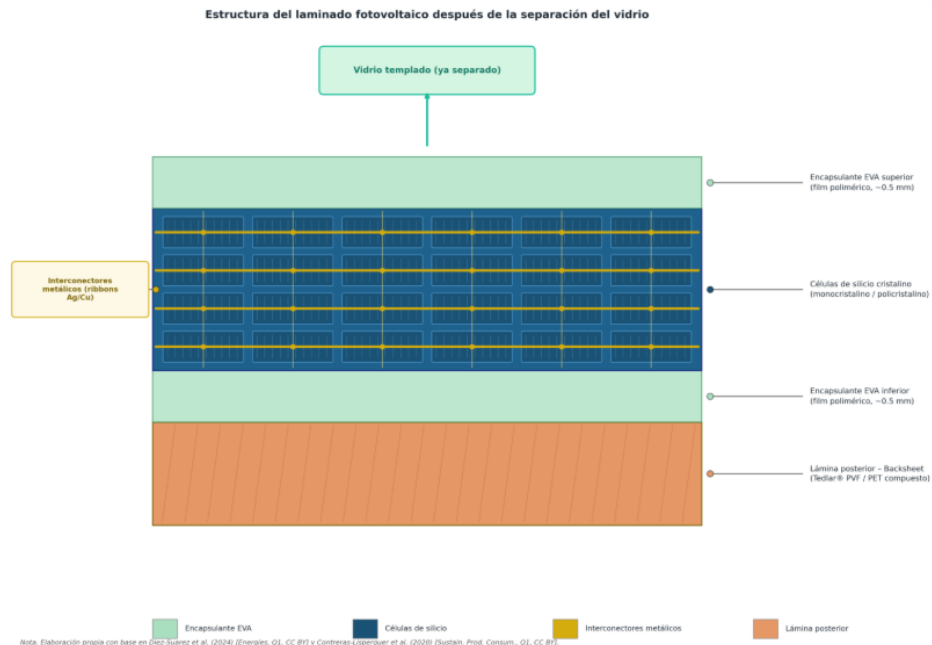
La composición aproximada de estos materiales dentro del laminado se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 62. Composición aproximada del laminado fotovoltaico después de la separación del vidrio

Material	Porcentaje aproximado en masa
Silicio (celdas)	3 – 5 %
Cobre (interconectores)	1 – 2 %
Plata (contactos metálicos)	0.05 – 0.1 %
Encapsulante EVA	6 – 8 %
Lámina posterior (backsheet)	3 – 4 %

Nota. Elaboración propia basado en Ansanelli et al. (2021), Mao et al. (2024), Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

Figura 15. Estructura del laminado fotovoltaico después de la separación del vidrio



Nota. Elaboración propia con base en Díez-Suárez et al. (2024) y Contreras-Lisperguer et al. (2020).

3. Reducción de tamaño del laminado

La presente sección describe tanto el procedimiento industrial estándar como las alternativas manuales adaptadas a gestores de menor escala. La selección del procedimiento debe realizarse en función del volumen semanal de laminado disponible, la infraestructura con la que cuenta el gestor y las condiciones del área de trabajo habilitada. La guía reconoce que, en el estado actual del sistema de gestión

RAEE en Colombia, la mayoría de los gestores autorizados operan a escala pequeña o mediana y no cuentan con equipos industriales de trituración o separación por corrientes de Foucault; por esta razón, las alternativas manuales aquí descritas constituyen una opción técnicamente válida para el corto plazo, coherente con el enfoque de implementación progresiva propuesto por la Política Nacional RAEE (MADS, 2015) y documentada en la literatura de gestión de residuos FV (Ganesan & Valderrama, 2022; IEA-PVPS, 2021).

Tabla 63. Procedimientos y equipos alternativos según la escala de operación del gestor

Escala de operación	Procedimiento / equipos alternativos	Ventajas	Limitaciones
Pequeña escala (1–5 módulos/semana)	Procedimiento manual con herramientas de mano aisladas: martillo de goma, escoplo, alicates. Separación manual de fracciones con imán de mano y bandeja densimétrica de agua.	Inversión mínima. Sin necesidad de equipos industriales. Implementable con herramientas de taller RAEE existentes.	Rendimiento bajo. Mayor exposición del operario al polvo de celdas. EPP riguroso obligatorio. No apto para recuperación de plata.
Escala media (5–20 módulos/semana)	Trituradora de baja velocidad para residuos electrónicos ($\geq 1,5$ kW) + separador magnético de mano o de mesa. Bandeja densimétrica o flotación en agua para Si/polímeros.	Equipos de mediana inversión disponibles en el mercado nacional. Compatibles con talleres RAEE medianos.	Requiere área ventilada con extracción localizada. Capacitación del operario en manejo de RESPEL.
Gran escala (> 20 módulos/semana)	Trituradora industrial de baja velocidad + separador por corrientes de Foucault + mesa densimétrica industrial. Sistema de extracción y filtración de polvo certificado.	Alta eficiencia de recuperación (Cu ≥ 90 %, Si ≥ 10 %). Proceso más automatizable. Compatible con plantas de reciclaje de RAEE de gran escala.	Alta inversión inicial. Requiere licencia ambiental específica. Solo viable para plantas especializadas o consorcios de gestores.

Nota. Elaborada con base en IEA-PVPS (2021), Ganesan & Valderrama (2022) y Bošnjaković et al. (2023). Los umbrales de escala son orientativos; el gestor debe evaluar su capacidad instalada antes de seleccionar el procedimiento.

3.1. Procedimiento manual para reducción de tamaño y separación de fracciones (1–5 módulos/semana)

El procedimiento manual aplica cuando el gestor no dispone de trituradora industrial. Se ejecuta sobre la superficie

de trabajo habilitada conforme a la sección 3.2, con EPP completo (mascarilla N95/P100, guantes nivel C, gafas de seguridad). La totalidad del procedimiento debe realizarse sobre una manta de contención para capturar los fragmentos y el polvo generado (Li et al., 2024; Bošnjaković et al., 2023).

⚠ EPP obligatorio durante todo el procedimiento manual: La fragmentación manual del laminado genera polvo de celdas con partículas de silicio y trazas de plomo. Mascarilla N95/P100, guantes de corte nivel C y gafas de seguridad son obligatorios desde el primer golpe hasta el depósito final de las fracciones. No ejecutar este procedimiento sin ventilación del área.

Tabla 64. Procedimiento manual para reducción de tamaño y separación de fracciones

1	Colocar el laminado sobre la manta de contención en la superficie de trabajo La manta debe sobrepasar el perímetro del laminado en al menos 20 cm en cada borde. Verificar que el laminado no contiene fragmentos de vidrio residual (Fase 4 completada correctamente). Registrar el peso inicial del laminado antes de comenzar.
---	--

2	Fracturar el laminado con martillo de goma sobre toda la superficie Aplicar golpes uniformes de mediana intensidad en una cuadrícula de 10 × 10 cm. El objetivo es fracturar las celdas y separar el encapsulante EVA de los fragmentos de silicio. No golpear el centro del módulo con fuerza excesiva; trabajar desde los bordes hacia el centro.
3	Separar manualmente los fragmentos de celda del encapsulante EVA con escoplo Introducir el escoplo entre la capa de EVA y los fragmentos de silicio con movimiento de palanca. El EVA cede progresivamente a temperatura ambiente; si resiste, aplicar calor suave (pistola de aire a 60 °C máx.). Depositar los fragmentos de silicio en el contenedor 'SILICIO — RESIDUO FV' a medida que se separan.
4	Separar los interconectores de cobre con alicates de punta fina Retirar manualmente los interconectores metálicos visibles de los fragmentos de celda. Pasar un imán de mano sobre la mezcla restante para capturar fragmentos ferrosos. Depositar los metales recuperados en el contenedor 'COBRE PARA RECICLAJE'.
5	Separar silicio de polímeros por flotación en agua (si el equipo no está disponible) Llenar una bandeja con agua limpia. Verter la mezcla de fragmentos (< 1 cm) sobre la bandeja. Los fragmentos de silicio (densidad ~2,33 g/cm³) se hunden; los polímeros EVA flotan. Retirar los polímeros con espumadera; decantar el silicio en el fondo de la bandeja. El agua contaminada con polvo de celdas debe gestionarse como efluente RESPEL (Decreto 4741 de 2005).
6	Tamizar la mezcla final para clasificar fracciones por tamaño Pasar el material sobre tamiz de malla 5 mm: los fragmentos > 5 mm vuelven al paso 2. Los finos < 5 mm que no pudieron separarse se depositan en contenedor RESPEL cerrado. Pesar cada fracción final y registrar en el formulario de trazabilidad.

Nota. Elaboración propia con base en (Li et al., 2024; Bošnjaković et al., 2023).

Tabla 65. Herramientas e insumos para el procedimiento manual de pequeña escala

Herramienta / equipo	Función en el procedimiento manual	Disponibilidad en Colombia	Observaciones de uso
Martillo de goma (500 g – 1 kg)	Fracturar el laminado para iniciar la separación de celdas del encapsulante EVA	Ferretería industrial. No requiere adquisición especializada.	Usar sobre superficie de trabajo con manta de contención de fragmentos.
Escoplo de acero inoxidable	Separar manualmente los fragmentos de celda del encapsulante EVA por palanca	Herramienta estándar de taller	Usar guantes nivel C. No aplicar fuerza excesiva — el EVA cede progresivamente.
Alicates de punta fina aislados (1 000 V)	Retirar los interconectores metálicos de los fragmentos de celda	Ya requeridos en Fase 3 (remoción de cables)	Los interconectores de cobre pueden separarse del laminado triturado con esta herramienta.
Imán de ferrita o neodimio (mano)	Separar fragmentos metálicos ferrosos de la mezcla triturada	Disponible en proveedores de ferretería. Bajo costo.	Efectivo para fragmentos ≥ 1 mm. Complementar con clasificación visual para fracciones finas.

Herramienta / equipo	Función en el procedimiento manual	Disponibilidad en Colombia	Observaciones de uso
Bandeja con agua (flotación)	Separar silicio (densidad ~2,33 g/cm³) de polímeros (densidad < 1,3 g/cm³)	Sin costo de inversión. Implementable con materiales de cocina industrial.	Solo válido para fragmentos < 1 cm. Agua contaminada con polvo de celdas: gestionar como efluente RESPEL.
Tamiz o criba de malla 5 mm	Clasificar el material triturado por tamaño antes de la separación	Disponible en ferreterías. Bajo costo.	Separar fracciones gruesas (> 5 mm) para reproceso manual y fracciones finas para depósito en contenedor RESPEL.

Nota. Elaborada con base en Bošnjaković et al. (2023), Li et al. (2024) e IEA-PVPS (2021). Todas las herramientas deben estar disponibles en talleres de reparación de equipos electrónicos en Colombia.

Con el propósito de continuar con el proceso de disposición, el primer paso en el tratamiento del laminado consiste en reducir el tamaño del material mediante trituración controlada, en donde se permite fragmentar las celdas fotovoltaicas y liberar las interconexiones metálicas presentes en el laminado; dicha trituración se realiza generalmente utilizando equipos industriales diseñados para el tratamiento de residuos electrónicos o materiales compuestos (Dias et al., 2021; Deng et al., 2022).

Los equipos que son comúnmente utilizados en esta etapa incluyen:

- Trituradoras industriales de baja velocidad.
- Molinos de impacto.
- Sistemas de trituración controlada

La reducción de tamaño facilita las operaciones posteriores de separación de materiales al liberar las diferentes fracciones presentes en el laminado.

3.2. Alianzas con plantas industriales de mayor escala

Cuando el gestor de pequeña o mediana escala no cuente con la infraestructura ni el volumen mínimo para ejecutar el tratamiento del laminado de manera eficiente, la guía recomienda explorar modelos de alianza o asociatividad con plantas industriales de mayor capacidad. Estas alianzas permiten que el gestor pequeño ejecute las fases de pretratamiento y desensamble (Fases 3 y 4) dentro de su capacidad instalada y derive el laminado resultante a una planta con equipos de trituración y separación de fracciones, optimizando la tasa de recuperación de materiales y reduciendo el riesgo de manejo inadecuado del laminado (Ganesan & Valderrama, 2022; Das & Sarmah, 2025).

Tabla 66. Modelos de alianza industrial para gestores de pequeña y mediana escala

Modalidad de alianza	Descripción del modelo	Viabilidad en Colombia
Consorcio o agrupación de gestores RAEE pequeños	Varios gestores de pequeña escala acumulan lotes de laminado hasta alcanzar volumen mínimo para acceder a planta industrial.	Modelo replicable en Colombia con base en los esquemas de posconsumo del Decreto 284 de 2018. Requiere acuerdo de intención entre gestores ante el MADS.

Modalidad de alianza	Descripción del modelo	Viabilidad en Colombia
	Coordinación logística y distribución de costos.	
Alianza con planta de reciclaje de RAEE de mayor escala	El gestor pequeño entrega el laminado pre-clasificado a una planta de reciclaje electrónico con capacidad de trituración industrial, a cambio de un porcentaje de los materiales recuperados o pago por servicio.	Viable en ciudades con gestores RAEE medianos o grandes (Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla). El gestor pequeño retiene la cadena de trazabilidad y los certificados.
Alianza con planta de reciclaje de metales no ferrosos	El laminado pre-triturado manualmente se entrega a una planta de reciclaje de chatarra electrónica para la separación final de fracciones metálicas.	Disponible en las principales ciudades colombianas. La planta receptora debe tener licencia ambiental vigente para RAEE o metales no ferrosos.
Transferencia directa al fabricante o importador (responsabilidad extendida)	Bajo el principio de responsabilidad extendida del Decreto 284 de 2018, el gestor puede transferir el laminado al fabricante o importador del módulo para su gestión en planta especializada.	Aplicable para lotes de módulos de marcas con programas de posconsumo activos. El gestor conserva el formulario de transferencia como evidencia normativa.

Nota. Elaborada con base en el Decreto 284 de 2018, la Política Nacional RAEE (MADS, 2015), Ganesan & Valderrama (2022) y Das & Sarmah (2025).

💡 Recomendación operativa para gestores de pequeña escala: Mientras no se disponga de infraestructura específica para el tratamiento del laminado fotovoltaico, el gestor de pequeña escala debe priorizar la ejecución correcta de las Fases 1 a 4 (retiro, embalaje, pretratamiento y desensamble), que sí están al alcance de su capacidad instalada, y gestionar el laminado resultante a través de una alianza con planta de mayor escala o mediante almacenamiento temporal certificado hasta que se habilite la infraestructura adecuada.

4. Separación de fracciones metálicas

Una vez se realice la trituración inicial, el material resultante contiene una mezcla de fragmentos de silicio, metales conductores y polímeros, en esta etapa se aplican técnicas de separación física que permiten recuperar los metales presentes en las interconexiones de las celdas solares, en donde algunas de dichas técnicas se incluyen los siguientes procesos:

- Separación magnética.
- Separación por corrientes de Foucault.

- Clasificación manual complementaria.

Las técnicas listadas previamente permiten recuperar principalmente cobre y pequeñas cantidades de plata presentes en los contactos metálicos de las celdas fotovoltaicas.

Diversos estudios han reportado que mediante procesos mecánicos de separación es posible recuperar entre 85 % y 95 % del cobre presente en el laminado y entre 70 % y 90 % de los metales conductores presentes en las interconexiones del módulo (Deng et al., 2022).

5. Recuperación de silicio

Después de la separación de metales, el material restante contiene principalmente fragmentos de celdas fotovoltaicas compuestas por silicio cristalino dependiendo del nivel de procesamiento disponible, este material puede:

- Enviarse a procesos especializados de recuperación de silicio.

- Reutilizarse como materia prima secundaria en procesos metalúrgicos.
- Utilizarse como material de carga en industrias de fundición.

Estudios recientes han señalado que los procesos de reciclaje fotovoltaico pueden recuperar entre 80 % y 90 % del silicio presente en las celdas, dependiendo de la tecnología utilizada para su tratamiento (Ansanelli et al., 2021; Deng et al., 2022; Dias et al., 2021).

Tabla 67. Porcentajes aproximados de recuperación de materiales en el tratamiento del laminado

Material	% recuperación	Método principal
Cobre	85–95%	Separación mecánica / corrientes Foucault
Plata	70–90%	Separación mecánica / procesos metalúrgicos
Silicio	80–90%	Trituración controlada / procesos especializados
Polímeros	—	Recuperación energética / coprocesamiento

Nota. Elaboración propia adaptado de Ansanelli et al. (2021), Mao et al. (2024), Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

5.1. Procedimiento paso a paso — Reducción de tamaño y separación de fracciones

Una vez separados el marco de aluminio y el vidrio frontal en la Fase 4, el laminado resultante debe procesarse para liberar y recuperar las fracciones de valor: silicio, metales conductores y polímeros. Las

operaciones se ejecutan en dos etapas secuenciales: (a) reducción de tamaño mediante trituración controlada y (b) separación física de fracciones por densidad y propiedades magnéticas. Ambas operaciones deben ejecutarse en el área de pretratamiento habilitada conforme a la sección 3.2 de esta guía (Deng et al., 2022; Das & Sarmah, 2025).

⚠ Requisito previo obligatorio: Verificar que el laminado no contiene fragmentos de vidrio residual antes de introducirlo en la trituradora. El vidrio residual puede dañar los elementos de corte y generar partículas peligrosas. Usar guantes de corte nivel C y gafas de seguridad durante todo el procedimiento.

A. Reducción de tamaño del laminado

Tabla 68. Reducción de tamaño del laminado

1	Verificar el estado del laminado antes de la trituración
---	--

	Confirmar que el laminado proviene de la Fase 4 correctamente ejecutada. Verificar ausencia de fragmentos de vidrio residual en ambas caras. Confirmar tensión DC = 0 V con multímetro si el laminado conserva cables. Registrar el peso del laminado completo en el formulario de trazabilidad.
2	Preparar la trituradora industrial de baja velocidad Verificar que el equipo esté apagado y bloqueado (lockout/tagout) antes de la inspección. Revisar el estado de los elementos de corte — detener si hay desgaste visible. Ajustar la abertura de la criba según el tamaño objetivo de fragmento (< 5 cm). Colocar el contenedor de recolección bajo la salida de la trituradora.
3	Introducir el laminado y ejecutar la trituración Alimentar el laminado en piezas manejables — no introducir el panel completo de una sola vez. Operar la trituradora a baja velocidad para minimizar la generación de polvo. Monitorear la salida: los fragmentos deben ser uniformes y sin partículas muy finas. Si se genera humo o calor excesivo: detener inmediatamente y ventilar el área.

Nota. Elaboración propia adaptado de (Bošnjaković et al., 2023; IEC 62446-1, 2018; Deng et al., 2022; Dias et al., 2021; Das & Sarmah, 2025; Li et al., 2024; Resolución 2400, 1979)

 **Nota de seguridad — polvo de celdas:** El polvo generado durante la trituración puede contener partículas de silicio, plomo (soldaduras) y plata. Usar mascarilla N95/P100 en todo momento durante la trituración. Mantener el área ventilada o con extracción localizada (Li et al., 2024).

B. Separación de fracciones metálicas

Tabla 69 Separación de fracciones metálicas

4	Aplicar separación magnética para recuperar cobre e interconectores Pasar el material triturado por la cinta magnética o separador de tambor magnético.
---	--

	Los interconectores de cobre y contactos metálicos quedan retenidos en el imán. Retirar manualmente los fragmentos metálicos y depositarlos en el contenedor de cobre. Repetir el paso si la eficiencia de recuperación es inferior al 90 % estimado.
5	Aplicar separación por corrientes de Foucault (si el equipo está disponible) Las corrientes de Foucault permiten separar metales no ferrosos (aluminio residual, cobre). El material no metálico (silicio, polímeros) pasa sin desviarse. Recolectar la fracción metálica en contenedor etiquetado 'METALES CONDUCTORES — RECICLAJE'. Si no se dispone del equipo: separar manualmente bajo lupa y con pinzas no conductoras.
6	Separar la fracción de silicio de los polímeros La fracción restante contiene silicio y polímeros (EVA + backsheet). Aplicar separación por densidad (mesa densimétrica o flotación en agua) si el equipo está disponible. El silicio (densidad $\sim 2,33 \text{ g/cm}^3$) se separa de los polímeros (densidad $< 1,3 \text{ g/cm}^3$). Depositar los fragmentos de silicio en contenedor etiquetado 'SILICIO — RESIDUO FV'. Depositar los polímeros en contenedor etiquetado 'POLÍMEROS — EVA / BACKSHEET'.
7	Registrar y etiquetar las fracciones recuperadas Pesar cada fracción por separado: metales, silicio, polímeros. Registrar en el formulario: peso por fracción, código del módulo de origen y fecha. Calcular la tasa de recuperación total: $\text{suma de fracciones} / \text{peso inicial del laminado} \times 100$. Meta: tasa de recuperación $\geq 85 \%$ en masa del laminado procesado.

Nota. Elaboración propia adaptado de (Deng et al., 2022; Gahlot et al., 2022; Lim et al., 2022; Dias et al., 2021; Ansanelli et al., 2021; Mao et al., 2024; Das & Sarmah, 2025; IEA-PVPS, 2021; Decreto 4741, 2005)

Tabla 70. Lista de verificación previa al inicio del procesamiento del laminado

☐	Criterio de verificación	¿Conforme?
☐	Tensión DC verificada = 0 V antes de iniciar la trituración del laminado	☐ Sí ☐ No
☐	El laminado está libre de vidrio residual (separación completa de la Fase 4)	☐ Sí ☐ No
☐	La trituradora opera dentro del rango de velocidad especificado por el fabricante	☐ Sí ☐ No
☐	Los fragmentos resultantes de la trituración alcanzan el tamaño objetivo (< 5 cm)	☐ Sí ☐ No
☐	La separación magnética recuperó los interconectores de cobre correctamente	☐ Sí ☐ No
☐	Los fragmentos de silicio fueron segregados y etiquetados para su destino final	☐ Sí ☐ No
☐	Las fracciones poliméricas (EVA / backsheet) fueron depositadas en el contenedor correspondiente	☐ Sí ☐ No
☐	Se registró el peso de cada fracción recuperada en el formulario de trazabilidad	☐ Sí ☐ No

Responsable: _____ Módulo N.º: _____ Fecha: _____

Nota. Procedimiento elaborado con base en Deng et al. (2022), Das & Sarmah (2025), Ansanelli et al. (2021), Mao et al. (2024) y los lineamientos de seguridad de la ISO 45001:2018+Amd 1:2024 y la Resolución 2400 de 1979.

6. Gestión de fracciones poliméricas

Después de la recuperación de metales y fragmentos de celdas fotovoltaicas, el material restante está compuesto

principalmente por polímeros provenientes del encapsulante EVA y de la lámina posterior del módulo.

La gestión de las fracciones poliméricas provenientes del encapsulante EVA y del

backsheet mediante valorización energética o co-procesamiento en hornos cementeros constituye una opción técnicamente viable para el contexto colombiano de corto y mediano plazo. Sin embargo, su implementación está sujeta a requisitos normativos específicos que el gestor receptor debe cumplir antes de recibir estas fracciones. La Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece los límites máximos permisibles de emisiones atmosféricas para las fuentes fijas que ejecutan este tipo de procesos, incluyendo material particulado, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Las fracciones poliméricas de los módulos fotovoltaicos pueden contener aditivos retardantes de llama halogenados cuya combustión incompleta genera emisiones tóxicas; por esta razón, el generador debe verificar la compatibilidad química de la fracción con las condiciones de operación de la planta receptora antes de proceder a la entrega (Deng et al., 2022; Li et al., 2024).

En ningún caso se autoriza la quema a cielo abierto, la incineración artesanal o la combustión no controlada de las

fracciones poliméricas generadas durante el tratamiento del laminado fotovoltaico. Estas prácticas contravienen la Resolución 909 de 2008, el Decreto 4741 de 2005 (para fracciones con características de peligrosidad) y la Ley 1333 de 2009 sobre infracciones y sanciones ambientales.

Estas fracciones presentan menor valor de recuperación material y suelen gestionarse mediante:

- Recuperación energética
- Coprocesamiento en procesos industriales
- Disposición controlada en sistemas de gestión de residuos industriales.

El coprocesamiento en instalaciones industriales ha sido identificado como una alternativa viable para la gestión de fracciones poliméricas provenientes del reciclaje de paneles fotovoltaicos, permitiendo aprovechar su contenido energético dentro de procesos industriales (Deng et al., 2022; Dias et al., 2021).

Tabla 71. Lista de verificación previa a la entrega de fracciones para tratamiento térmico o químico

☐	Criterio de verificación previa — tratamientos térmicos y químicos	¿Conforme?
☐	El gestor receptor cuenta con licencia ambiental vigente para el tipo de tratamiento térmico o químico a ejecutar.	☐ Sí ☐ No
☐	La licencia ambiental del gestor incluye expresamente el tratamiento de residuos de módulos fotovoltaicos o residuos electrónicos de composición similar.	☐ Sí ☐ No
☐	El gestor cuenta con sistema de captura y tratamiento de gases de combustión certificado y operativo.	☐ Sí ☐ No
☐	Las emisiones atmosféricas del proceso cumplen con los límites establecidos en la Resolución 909 de 2008 para la fuente fija correspondiente.	☐ Sí ☐ No
☐	El generador ha recibido y conserva el certificado de recepción o de co-procesamiento/incineración del gestor receptor.	☐ Sí ☐ No
☐	Se ha notificado a la autoridad ambiental competente (CAR o ANLA) sobre la entrega de fracciones para tratamiento térmico o químico, según corresponda.	☐ Sí ☐ No

Nota. Lista elaborada con base en la Resolución 909 de 2008, el Decreto 4741 de 2005, la Ley 1333 de 2009 y la Resolución 631 de 2015. Todos los criterios deben estar marcados como conformes antes de autorizar la entrega.

⊘ Práctica expresamente prohibida: La quema a cielo abierto, la incineración artesanal o la combustión no controlada de cualquier fracción de módulo fotovoltaico (polímeros, celdas, encapsulante) está expresamente prohibida. Estas prácticas incumplen la Resolución 909 de 2008 y el Decreto 4741 de 2005, y pueden generar responsabilidad administrativa, civil y penal conforme a la Ley 1333 de 2009.

7. Equipos utilizados en el tratamiento del laminado y EPP

Tabla 72. Equipos utilizados en el tratamiento del laminado fotovoltaico

Equipo	Función en el proceso	Etapas asociada
Trituradora industrial	Reducción de tamaño del laminado	Fase 5.3
Molino de impacto	Fragmentación de celdas	Fase 5.3
Separador magnético	Recuperación de metales ferrosos	Fase 5.4
Separador por corrientes de Foucault	Recuperación de metales no ferrosos	Fase 5.4
Sistema de clasificación vibratoria	Separación de fracciones de material	Fase 5.4

Nota. Adaptado de Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

El tratamiento del laminado fotovoltaico implica la trituración de celdas de silicio cristalino que contienen materiales potencialmente peligrosos: plomo en las soldaduras de los interconectores, plata en los contactos metálicos y partículas finas de silicio generadas durante la fragmentación. Esta sección establece los EPP obligatorios y las medidas de prevención de riesgos aplicables a las operaciones 5.3 y 5.4, en cumplimiento de la ISO 45001:2018+Amd 1:2024 y la Resolución 2400 de 1979 (Li et al., 2024; Bošnjaković et al., 2023).

⚠ Advertencia — exposición a materiales peligrosos: Las celdas fotovoltaicas contienen plomo en las soldaduras. La trituración genera polvo fino que puede ser inhalado. El operario debe portar todos los EPP obligatorios ANTES de iniciar cualquier operación de trituración.

A. Elementos de protección personal (EPP)

Tabla 73. EPP a utilizar en el tratamiento del laminado fotovoltaico

EPP	Especificación técnica	Carácter	Riesgo que mitiga	Norma
Mascarilla N95 / P100	Filtración ≥ 95 % partículas ≥ 0,3 µm; NIOSH	OBLIGATORIO	Polvo de celdas con silicio, plomo y plata durante la trituración	NIOSH 42 CFR 84
Guantes de corte nivel C	ISO 13997:2024; nivel C (≥ 10 N)	OBLIGATORIO	Bordes cortantes de fragmentos de silicio y metales	ISO 13997:2024
Gafas de seguridad	Polycarbonato con protección lateral; ANSI Z87.1:2020	OBLIGATORIO	Proyección de fragmentos durante trituración y separación	ANSI/ISEA Z87.1:2020

EPP	Especificación técnica	Carácter	Riesgo que mitiga	Norma
Calzado de seguridad	Punta de acero; suela antideslizante; NTC 2396	OBLIGATORIO	Caída de fragmentos pesados o del laminado	NTC 2396
Delantal de protección	PVC o cuero; largo $\geq$ 90 cm	RECOMENDADO	Contacto de fragmentos con el tronco durante la trituración	ISO 45001:2018
Protección auditiva	SNR $\geq$ 20 dB si el ruido supera 80 dB(A)	SEGÚN APLIQUE	Ruido de trituradora industrial en operación continua	Resolución 2400/1979

Nota. EPP definidos con base en ISO 13997:2024, ANSI/ISEA Z87.1:2020, NTC 2396, NIOSH (1996) e ISO 45001:2018+Amd 1:2024.

B. Identificación y control de riesgos

Tabla 74. Identificación y control de riesgos en el tratamiento del laminado fotovoltaico

Riesgo	Causa probable	Medida de control	Señal de alerta	Qué hacer
Inhalación de polvo tóxico	Trituración de celdas sin extracción	Mascarilla N95/P100 + ventilación localizada	Irritación nasal o sabor metálico	Detener, ventilar, consultar médico
Corte por fragmentos	Manipulación sin guantes de nivel C	Guantes nivel C en todo momento	Corte en manos o muñecas	Limpiar, cubrir, reportar a SST
Proyección de partículas	Trituración a velocidad inadecuada	Gafas de seguridad + pantalla facial	Irritación ocular	Lavar con agua, revisión médica
Exposición a plomo	Soldaduras de celdas al triturarse	EPP completo + no comer en el área	Sabor metálico persistente	Comunicar a SST, evaluar exposición
Ruido excesivo	Trituradora industrial en operación	Protección auditiva SNR $\geq$ 20 dB	Zumbido o dolor de oídos	Salir del área, usar protección

Nota. Matriz elaborada con base en la Resolución 2400 de 1979, ISO 45001:2018+Amd 1:2024, Li et al. (2024) y Bošnjaković et al. (2023).

C. Condiciones requeridas en el área de tratamiento del laminado

Tabla 75. Condiciones requeridas en el área de tratamiento del laminado

Condición requerida	Especificación mínima
Ventilación	Extracción localizada ($\geq$ 0,5 m/s en zona de trituración) o ventilación general $\geq$ 10 cambios de aire/hora.
Iluminación	$\geq$ 500 lux sobre la zona de trabajo; $\geq$ 1 000 lux para inspección de fracciones (ISO/CIE 8995-1:2025).

Condición requerida	Especificación mínima
Superficie de trabajo	Piso impermeable, lavable y sin grietas para facilitar la limpieza del polvo de celdas.
Señalización	Señales de peligro por polvo tóxico, uso obligatorio de EPP y prohibición de comer en el área.
Acceso restringido	Solo personal con EPP completo puede ingresar al área de trituración durante la operación.
Lavado de manos	Punto de lavado con agua y jabón disponible a ≤ 10 m del puesto de trabajo.

Nota. Condiciones elaboradas con base en la Resolución 2400 de 1979, la Resolución 0312 de 2019, ISO 45001:2018+Amd 1:2024 e ISO/CIE 8995-1:2025.

8. Salida de la fase

Una vez finalizado el tratamiento del laminado fotovoltaico se obtienen diferentes fracciones de materiales que pueden ser gestionadas dentro de procesos de reciclaje o valorización. Dentro de estos materiales recuperados, los principales que se obtendrán en esta etapa incluyen:

- Fragmentos de silicio provenientes de las celdas fotovoltaicas
- Metales conductores presentes en las interconexiones del módulo
- Fracciones poliméricas provenientes del encapsulante EVA y del backsheet

Estos materiales pueden integrarse posteriormente en procesos industriales de reciclaje o ser gestionados dentro de sistemas de recuperación energética, dependiendo de sus características físicas y de la infraestructura disponible para su tratamiento.

Marco normativo aplicable: El tratamiento del laminado genera fracciones que pueden clasificarse como residuos peligrosos conforme al Decreto 4741 de 2005, particularmente por la presencia de plomo en soldaduras y plata en contactos metálicos. Como referente técnico internacional, el Reglamento (UE) N.º 1357/2014 orienta la clasificación de estas fracciones (Comisión Europea, 2014), en tanto Colombia desarrolla normativa sectorial específica para residuos fotovoltaicos.

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 76. Indicadores cumplimiento fase 5

Indicadores de cumplimiento	
☐	El laminado fotovoltaico fue sometido a reducción de tamaño mediante trituración controlada.
☐	Se aplicaron técnicas de separación física (magnética y/o corrientes de Foucault) para recuperar metales conductores del laminado triturado.

Indicadores de cumplimiento	
☐	Los fragmentos de silicio fueron recuperados y destinados a proceso especializado de valorización o reutilización industrial.
☐	Las fracciones poliméricas (EVA y backsheet) fueron gestionadas mediante valorización energética o coprocesamiento industrial.
☐	Se registraron las cantidades aproximadas de cada fracción recuperada durante el tratamiento del laminado.

Nota. Elaboración propia.

FASE 6. GESTIÓN DE FRACCIONES RESIDUALES Y VALORIZACIÓN FINAL (CIERRE DEL PROCESO DE RECICLAJE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS)

1. Objetivo de la fase

La fase final del proceso de gestión de residuos fotovoltaicos se orienta a definir el destino y tratamiento de las fracciones de material que no han sido íntegramente recuperadas en las etapas previas del proceso. De esta manera y luego de ejecutadas las etapas de pretratamiento, desensamble y tratamiento de laminado, el proceso de reciclado genera diversas corrientes de materiales recuperados y fracciones residuales; mientras que algunos materiales pueden volver a introducirse directamente en los flujos industriales de reciclaje, otros requieren procesos adicionales de valorización o de eliminación controlada.

Es importante destacar que la correcta gestión de estas fracciones es clave para asegurar que el tratamiento de módulos fotovoltaicos contribuya eficazmente a la reducción de impactos ambientales y a la maximización de la recuperación de recursos, en el marco de los esquemas de economía circular.

2. Fracciones resultantes del proceso de reciclaje

Una vez finalizadas las fases del proceso de tratamiento de módulos fotovoltaicos, se tienen diferentes fracciones de materiales que deben gestionarse de manera diferenciada. Algunos de los principales tipos de materiales generados son:

- Aluminio recuperado del marco del módulo
- Vidrio proveniente de la separación del laminado
- Metales conductores recuperados de las interconexiones
- Fragmentos de silicio provenientes de las celdas fotovoltaicas
- Fracciones poliméricas provenientes del encapsulante EVA y del backsheet
- Residuos finos provenientes de procesos de trituración

Cada uno de los materiales mencionados previamente presenta unas características físicas y químicas

diferentes, por lo que su destino dentro de procesos de reciclaje o valorización puede variar.

Tabla 77. Fracciones de materiales generadas durante el reciclaje de módulos fotovoltaicos

Fracción de material	Origen en el módulo	Destino de gestión
Aluminio	Marco estructural	Reciclaje de metales
Vidrio	Capa frontal del módulo	Reciclaje en industria del vidrio
Cobre	Interconectores eléctricos	Reciclaje metalúrgico
Plata	Contactos de celdas	Recuperación metalúrgica
Silicio	Celdas fotovoltaicas	Reutilización industrial
Polímeros (EVA y backsheet)	Encapsulante y lámina posterior	Valorización energética
Residuos finos	Procesos de trituración del laminado	Disposición controlada en sistemas de gestión de residuos industriales

Nota. Elaboración propia con base en Ansanelli et al. (2021), Mao et al. (2024), Deng et al. (2022) y Das & Sarmah (2025).

2.1. Procedimiento paso a paso: valorización y trazabilidad de materiales

Una vez completado el tratamiento del laminado en la Fase 5, todas las fracciones recuperadas deben ser correctamente clasificadas, pesadas,

etiquetadas y dirigidas a sus respectivos canales de valorización o disposición final. Esta fase es la de cierre del ciclo de gestión del módulo fotovoltaico y su correcta ejecución determina el cumplimiento normativo ante el MADS y la autoridad ambiental competente (Ganesan & Valderrama, 2022; Das & Sarmah, 2025).

 **Documentación requerida al inicio de la Fase 6:** El operario debe contar con el formulario de trazabilidad de las Fases 1 a 5 completamente diligenciado, los pesos de cada fracción recuperada y los datos de identificación del módulo (código de trazabilidad, clase A/B/C y fecha de procesamiento). Sin esta información no se puede ejecutar la valorización con trazabilidad completa.

A. Clasificación y pesaje final de fracciones

Tabla 78. Clasificación y pesaje final de fracciones

1	Reunir todas las fracciones recuperadas en el área de valorización Trasladar los contenedores de cada fracción al área de pesaje y etiquetado.
---	---

Fracciones esperadas: aluminio (marco), vidrio, cobre (interconectores/cables), silicio, polímeros.

Verificar que ningún contenedor esté mezclado con fracciones de otro módulo o lote.

Confirmar que los contenedores de residuos peligrosos (RESPEL) estén herméticamente cerrados.

2

Pesar y registrar cada fracción de forma individual

Usar balanza con resolución mínima de 0,1 kg para fracciones ≥ 1 kg.

Usar balanza de precisión (0,01 g) para metales finos (plata, fragmentos de celdas).

Registrar en el formulario: nombre de la fracción, peso neto, código del módulo y fecha.

Calcular el porcentaje de recuperación: $\text{peso fracción} / \text{peso inicial del módulo} \times 100$.

3

Etiquetar cada contenedor con la información de trazabilidad

Etiqueta mínima: nombre de la fracción, peso, código del módulo, clase (A/B/C) y fecha.

Para RESPEL: agregar rombo de peligrosidad y código RESPEL según Decreto 4741 de 2005.

Para fracciones valorizables: indicar el nombre y código del gestor receptor.

Aplicar etiqueta autoadhesiva resistente a la humedad en lugar visible del contenedor.

Nota. Elaboración propia con base en (IEA-PVPS, 2021; Decreto 4741, 2005; Ganesan & Valderrama, 2022; Das & Sarmah, 2025; Ansanelli et al., 2021; Mahmoudi et al., 2021)

B. Dirección de fracciones a canales de valorización (operación 6.3 / 6.4)

4

Derivar el aluminio al canal de reciclaje de metales no ferrosos

Contactar al gestor de reciclaje de aluminio registrado en el SIUR / MADS.

Entregar el aluminio con el formulario de transferencia de residuos diligenciado.

Solicitar el certificado de recepción del gestor para el archivo de trazabilidad.

Meta: recuperación ≥ 95 % del aluminio del marco (Bulińska et al., 2025).

5	Derivar el vidrio al canal de reciclaje de la industria vidriera El vidrio recuperado puede enviarse a plantas de reciclaje de vidrio plano. Verificar que el vidrio no contenga fragmentos metálicos o polímeros adheridos. Completar el formulario de transferencia con peso y calidad del vidrio (limpio / contaminado). Gestores de vidrio en Colombia: industria vidriera local o chatarrerías autorizadas MADS.
6	Derivar los metales conductores (Cu, Ag) al canal de reciclaje de metales El cobre de interconectores y cables es el metal de mayor valor de recuperación. Separar físicamente el cobre (cables) de los fragmentos de interconectores (celdas). Entregar a gestor de metales no ferrosos autorizado con formulario de transferencia. La plata de los contactos requiere gestor con capacidad de recuperación metalúrgica.
7	Gestionar el silicio y los polímeros según disponibilidad de gestor Silicio: enviar a gestor RAEE autorizado para tratamiento de residuos peligrosos (plomo en soldaduras). EVA / backsheet: derivar a co-procesamiento en plantas cementeras o gestor de polímeros. Si no hay gestor disponible: almacenar en condiciones seguras hasta que se habilite uno. Documentar la imposibilidad de valorización inmediata en el formulario de trazabilidad.

Nota. Elaboración propia con base en (Bulińska et al., 2025; Ganesan & Valderrama, 2022; Decreto 284, 2018; IEA-PVPS, 2021; Mahmoudi et al., 2021; Gahlot et al., 2022; Deng et al., 2022; Ansanelli et al., 2021; Das & Sarmah, 2025; Li et al., 2024; Decreto 4741, 2005)

C. Trazabilidad y cierre documental

Tabla 79. Trazabilidad y cierre documental

8	Completar el formulario de trazabilidad integral del módulo El formulario debe cubrir todas las fases (1 a 6): retiro, embalaje, pretratamiento, desensamble, tratamiento y valorización. Registrar: código del módulo, clase, peso inicial, peso por fracción, gestor receptor y fecha de entrega.
---	---

Adjuntar los certificados de recepción de los gestores a cada formulario de módulo.

El formulario firmado es el documento de cumplimiento normativo ante la autoridad ambiental.

Reportar al gestor RAEE y conservar los registros por 5 años

Enviar el reporte de gestión al gestor RAEE principal responsable del módulo.

9 Conservar copia física o digital de todos los formularios por mínimo 5 años (Decreto 4741 de 2005).

Si el generador es empresa: reportar al MADS a través del SIUR según la Ley 1672 de 2013.

Si el generador es particular: el gestor RAEE receptor asume la obligación de reporte.

Nota. Elaboración propia con base en (Decreto 4741, 2005; Decreto 284, 2018; Kabir et al., 2023; Ganesan & Valderrama, 2022; Ley 1672, 2013; Política Nacional RAEE, 2017; Das & Sarmah, 2025)

2.2. EPP y prevención de riesgos en la valorización y disposición final

Aunque la Fase 6 es predominantemente documental y logística, implica la manipulación de fracciones que pueden contener materiales peligrosos: polvo de celdas con plomo y plata, fragmentos de

vidrio y residuos finos catalogados como RESPEL según el Decreto 4741 de 2005. El operario a cargo de la valorización y el cierre documental debe contar con los EPP adecuados al tipo de fracción que manipula, en cumplimiento de la ISO 45001:2018+Amd 1:2024 y la Resolución 2400 de 1979 (Li et al., 2024; Gahlot et al., 2022).

⚠ Advertencia — fracciones RESPEL en la Fase 6: Los residuos finos de trituración (silicio + soldaduras de plomo) generados en la Fase 5 se clasifican como residuos peligrosos (RESPEL) según el Decreto 4741 de 2005 por su contenido de plomo. Su manipulación en la Fase 6 requiere EPP completo y entrega exclusiva a gestor autorizado por el MADS.

A. Elementos de protección personal (EPP) — Fase 6

Tabla 80. Elementos de protección personal (EPP) — Fase 6

EPP	Especificación técnica	Carácter	Riesgo que mitiga	Norma
Guantes de nitrilo o vinilo	Espesor $\geq 0,2$ mm; sin látex	OBLIGATORIO	Contacto con residuos finos de celdas con plomo y	NTC 2037 / ISO 45001

EPP	Especificación técnica	Carácter	Riesgo que mitiga	Norma
			plata durante el pesaje y etiquetado	
Guantes de corte nivel C	ISO 13997:2024; nivel C (≥ 10 N)	OBLIGATORIO	Bordes cortantes de fragmentos metálicos o de vidrio durante la manipulación de fracciones	ISO 13997:2024
Gafas de seguridad	Polycarbonato con protección lateral; ANSI Z87.1:2020	OBLIGATORIO	Proyección de partículas finas durante el pesaje o trasvase de fracciones	ANSI/ISEA Z87.1:2020
Calzado de seguridad	Punta de acero; suela antideslizante; NTC 2396	OBLIGATORIO	Caída de contenedores o fracciones pesadas durante el traslado al área de valorización	NTC 2396
Mascarilla N95	Filtración ≥ 95 % partículas $\geq 0,3 \mu\text{m}$	OBLIGATORIO Clase C	Polvo residual de celdas al abrir contenedores de silicio o residuos finos de módulos Clase C	NIOSH 42 CFR 84
Arnés + línea de vida	NTC 2037; anclaje certificado	SEGÚN APLIQUE	Trabajo en altura al trasladar pallets o cargar contenedores a vehículos elevados	NTC 2037

Nota. EPP definidos con base en ISO 13997:2024, ANSI/ISEA Z87.1:2020, NTC 2396, NTC 2037, NIOSH (1996) e ISO 45001:2018+Amd 1:2024.

B. Identificación y control de riesgos — Fase 6

Tabla 81. Identificación y control de riesgos — Fase 6

Riesgo	Causa probable	Medida de control	Señal de alerta	Qué hacer
Contacto con residuos peligrosos (RESPEL)	Apertura de contenedores de silicio o residuos finos sin EPP	Guantes de nitrilo + mascarilla N95 + gafas	Ardor en piel, irritación ocular o nasal	Lavar con agua, retirar del área, consultar médico
Corte por fragmentos metálicos o vidrio	Manipulación de fracciones sin guantes de corte	Guantes nivel C durante todo el pesaje y traslado	Corte en manos o muñecas	Limpiar, cubrir, reportar a SST
Caída de contenedores pesados	Contenedores mal asegurados durante el traslado en carretilla	Asegurar contenedores con correas; no sobrecargar carretilla	Contenedor volcado, derrame de fracción	Contener el derrame, registrar incidente, reportar a SST
Confusión de fracciones (mezcla)	Etiquetado deficiente o ausente en contenedores	Etiquetar inmediatamente al separar cada fracción	Fracción diferente dentro del contenedor	Segregar nuevamente; documentar no conformidad
Incumplimiento normativo (RESPEL sin gestor)	Almacenamiento temporal sin gestor receptor definido	Identificar gestor previo al inicio de la Fase 6	Almacenamiento prolongado sin gestión	Contactar MADS/CAR para orientación; documentar

Nota. Matriz elaborada con base en Resolución 2400 de 1979, ISO 45001:2018+Amd 1:2024, Decreto 4741 de 2005, Li et al. (2024) y Gahlot et al. (2022).

C. Condiciones requeridas en el área de valorización y cierre

Tabla 82. Condiciones requeridas en el área de valorización y cierre

Condición requerida	Especificación mínima
Ventilación	Área ventilada o con extracción localizada. Imprescindible al abrir contenedores de residuos finos con plomo.
Iluminación	≥ 500 lux sobre la zona de pesaje y etiquetado para verificar la correcta identificación de fracciones (ISO/CIE 8995-1:2025).
Zona de pesaje	Superficie plana y estable para la balanza. La balanza debe estar calibrada y nivelada antes de cada jornada.
Almacenamiento temporal	Área techada, seca y con acceso restringido para los contenedores RESPEL mientras se gestiona su traslado.
Señalización	Señales de peligro RESPEL, uso de EPP y zonas delimitadas por tipo de fracción (valorizable / peligrosa).
Registro documental	El formulario de trazabilidad debe estar disponible en papel o formato digital durante toda la operación de la Fase 6.

Nota. Condiciones elaboradas con base en la Resolución 2400 de 1979, la Resolución 0312 de 2019, el Decreto 4741 de 2005 e ISO/CIE 8995-1:2025.

3. Valorización de materiales recuperados

Al momento de realizar la valorización de los materiales recuperados en el proceso de reciclaje, la gran mayoría de materiales pueden reingresar a diferentes cadenas productivas industriales; entre las principales se pueden encontrar rutas de valorización como lo son:

3.1. Reciclaje de aluminio

Para el caso del aluminio, el cual es recuperado del marco del módulo, puede

ser procesado por medio de sistemas convencionales de reciclaje de metales, dado que este material presenta un alto valor de recuperación y puede reincorporarse en procesos de fundición industrial para la producción de nuevos perfiles o componentes metálicos (Bulińska et al., 2025).

3.2. Reciclaje de vidrio

El vidrio recuperado del módulo puede ser reutilizado como materia prima

secundaria en procesos industriales tales como:

- La fabricación de nuevos productos de vidrio.
- En materiales de construcción.
- En materiales aislantes.

Estas rutas de valorización del vidrio contribuyen al cierre del ciclo de materiales dentro de esquemas de economía circular aplicados al sector fotovoltaico (Bulińska et al., 2025; Ganesan & Valderrama, 2022).

3.3. Recuperación de metales conductores

Los metales de las interconexiones de las celdas fotovoltaicas, especialmente el cobre y la plata, pueden recuperarse por

medio de procesos metalúrgicos convencionales utilizados en la industria del reciclaje de metales.

3.4. Reutilización de silicio

Los fragmentos de silicio presentes y que son recuperados durante el tratamiento del laminado, pueden destinarse a procesos de tipo industrial en los cuales el material puede ser reutilizado como materia prima secundaria o material de carga en procesos metalúrgicos.

3.5. Tasas de recuperación esperadas por material

Con el propósito de orientar la planificación del proceso de valorización, la siguiente tabla presenta las tasas de recuperación esperadas para cada fracción de material, así como las rutas de valorización recomendadas en el contexto colombiano.

Tabla 83. Tasas de recuperación esperadas y rutas de valorización para cada fracción del módulo fotovoltaico

Material	Tasa de recuperación esperada	Ruta de valorización recomendada	Receptores en Colombia
Aluminio	90 – 98 %	Fundición y producción de nuevos perfiles metálicos	Gestores de chatarra metálica autorizados, industria del aluminio secundario
Vidrio	85 – 95 %	Materia prima secundaria para fabricación de vidrio o materiales de construcción	Industria vidriera, empresas de reciclaje de vidrio plano
Cobre	85 – 95 %	Reciclaje metalúrgico convencional	Gestores RAEE autorizados, industria del cobre secundario
Plata	70 – 90 %	Recuperación metalúrgica especializada	Gestores de metales preciosos, empresas de hidrometalurgia
Silicio	80 – 90 %	Reutilización como materia prima secundaria en procesos metalúrgicos o industria de fundición	Industrias metalúrgicas, empresas de materiales de construcción
Polímeros (EVA y backsheet)	N/A — valorización energética	Coprocesamiento en hornos industriales o cementeras	Industria cementera, plantas de coprocesamiento industrial

Nota. Elaboración propia con base en Ansanelli et al. (2021), Deng et al. (2022), Das & Sarmah (2025) y Bulińska et al. (2025).

3.6. Rutas de valorización en el contexto colombiano

En Colombia, la infraestructura disponible para la valorización de materiales provenientes del reciclaje fotovoltaico es aún incipiente en lo que respecta a procesos especializados para este tipo de residuos, sin embargo, los materiales recuperados pueden integrarse en cadenas productivas existentes aprovechando la infraestructura de reciclaje convencional disponible en el país. En este sentido se identifican las siguientes rutas viables:

El aluminio cuenta con la ruta de valorización más consolidada en Colombia, dado que existe una industria activa de reciclaje de chatarra metálica con capacidad para procesar perfiles de aluminio extruido provenientes de los marcos fotovoltaicos. Este material puede entregarse directamente a gestores de residuos metálicos autorizados por las autoridades ambientales competentes.

El vidrio recuperado puede destinarse a empresas recicladoras de vidrio plano presentes en el país, o bien incorporarse como material secundario en la industria de materiales de construcción. Dado que el vidrio de los módulos fotovoltaicos es vidrio templado de bajo contenido de hierro, su valorización puede requerir procesos de caracterización previos para verificar su compatibilidad con las líneas de producción del receptor.

Los metales conductores como cobre y plata pueden gestionarse a través de gestores RAEE autorizados que cuenten con procesos metalúrgicos para la recuperación de metales no ferrosos. La plata, dado su alto valor económico, justifica procesos de recuperación especializados mediante hidrometalurgia, los cuales están disponibles en algunas empresas del sector minero-metalúrgico colombiano.

El silicio recuperado presenta actualmente las mayores limitaciones de valorización en Colombia debido a la ausencia de industria especializada en reciclaje de silicio fotovoltaico. En consecuencia, se recomienda su gestión como materia prima secundaria en industrias de fundición o materiales de construcción, en tanto el país desarrolla capacidades especializadas para su tratamiento (Deng et al., 2022; Das & Sarmah, 2025).

4. Gestión de fracciones poliméricas

Las fracciones poliméricas provenientes del encapsulante EVA y del backsheet presentan algunas dificultades para el proceso de reciclaje debido a su naturaleza compuesta y a la degradación que sufren durante el ciclo de vida del módulo fotovoltaico.

Por esta razón, en muchos sistemas de reciclaje estas fracciones se gestionan mediante:

- Valorización energética en procesos industriales
- Coprocesamiento en instalaciones industriales
- Disposición controlada en sistemas de gestión de residuos industriales.

Es importante resaltar que la valorización energética permite aprovechar, como su mismo nombre lo dice, el contenido energético de los materiales dentro de procesos de tipo industrial, contribuyendo así a reducir la cantidad de residuos que van a disposición final.

En el contexto colombiano, el coprocesamiento en la industria cementera representa la alternativa más viable para la gestión de fracciones

poliméricas provenientes del reciclaje fotovoltaico. Esta ruta aprovecha el contenido energético de los polímeros como combustible alternativo dentro del proceso de producción de clínker, sustituyendo parcialmente combustibles fósiles convencionales. Colombia cuenta con una industria cementera activa con plantas que disponen de licencias ambientales para el coprocesamiento de residuos industriales, lo que hace viable esta alternativa en el corto plazo (Ganesan & Valderrama, 2022). En los casos en que el coprocesamiento no sea viable por restricciones técnicas o logísticas, las fracciones poliméricas deben gestionarse mediante disposición controlada en rellenos de seguridad autorizados, conforme a los lineamientos del Decreto 4741 de 2005.

5. Rutas de gestión alternativas — protocolo transitorio para gestores sin infraestructura específica en módulos FV

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

Tabla 84. Rutas de gestión alternativas según disponibilidad de infraestructura en Colombia

Canal de gestión	Tipo de ruta	Fracciones aplicables	Condiciones y restricciones
Gestor RAEE autorizado con capacidad específica para módulos FV	Ruta principal (ideal)	Todas las fracciones	Entrega directa con formulario de transferencia y certificado RESPEL si aplica
Gestor RAEE autorizado para RAEE convencional (sin línea FV específica)	Ruta transitoria prioritaria	Aluminio, vidrio, cobre (fracciones no peligrosas)	Acuerdo previo con el gestor sobre condiciones de recepción; fracciones peligrosas (Si, polvo) a gestor RESPEL
Empresa de reciclaje de aluminio autorizada por la CAR	Ruta transitoria — metales	Aluminio del marco	Requiere verificación de licencia ambiental; no aplica para laminado ni RESPEL
Industria vidriera o chatarrería autorizada MADS	Ruta transitoria — vidrio	Vidrio frontal limpio (sin contaminantes)	El vidrio debe estar libre de fragmentos metálicos y polímeros adheridos
Co-procesamiento en planta cementera autorizada	Ruta transitoria — polímeros	EVA / backsheet	Requiere certificado de coprocesamiento; no aplica para fracciones peligrosas

reconoce que el sistema de gestión RAEE en Colombia presenta brechas de cobertura geográfica y capacidad técnica que limitan el acceso de los generadores a gestores especializados. Esta realidad es especialmente marcada en el caso de los residuos fotovoltaicos, para los que no existe aún en Colombia una red de gestores con infraestructura específicamente diseñada para el tratamiento del laminado y las fracciones peligrosas (Ganesan & Valderrama, 2022). Ante este escenario, la presente sección establece un protocolo transitorio que orienta la derivación de fracciones a través de canales alternativos autorizados, en cumplimiento del Decreto 4741 de 2005 y el Decreto 284 de 2018, mientras se consolida la infraestructura de gestión especializada en el país.

△ Principio orientador de las rutas transitorias: Las rutas alternativas aquí descritas se aplican únicamente cuando no existe gestor RAEE con capacidad específica para módulos FV en el área de influencia del generador. No reemplazan la obligación de gestionar con entidades autorizadas por el MADS. Las fracciones clasificadas como RESPEL deben gestionarse siempre con gestor autorizado para residuos peligrosos, sin excepción.

Canal de gestión	Tipo de ruta	Fracciones aplicables	Condiciones y restricciones
Almacenamiento temporal certificado mientras se habilita gestor receptor	Ruta de contingencia	Cualquier fracción sin gestor disponible	Máximo 12 meses; condiciones de almacenamiento según Decreto 4741 de 2005; documentar en formulario de trazabilidad

Nota. Elaboración propia con base en el Decreto 4741 de 2005, el Decreto 284 de 2018, la Política Nacional RAEE (MADS, 2015), Ganesan & Valderrama (2022) y Das & Sarmah (2025). La identificación de gestores RAEE autorizados puede realizarse a través del SIUR: <https://www.minambiente.gov.co>

Tabla 85. Protocolo transitorio paso a paso para gestores sin infraestructura específica en módulos FV

N.º	Acción	Cómo ejecutarla	Observaciones clave
1	Identificar si existe gestor RAEE autorizado con capacidad específica para módulos FV en el área de influencia	Consultar el SIUR (Sistema Único de Información de Residuos) del MADS y el directorio de gestores RAEE del Decreto 284 de 2018	Si existe: proceder por ruta principal. Si no existe: activar rutas transitorias según fracción
2	Segregar las fracciones valorizables (Al, vidrio, Cu) de las fracciones peligrosas (Si con Pb, polvo de celdas)	Pesaje y etiquetado por fracción según procedimiento de la Fase 6, sección 6.3	Las fracciones peligrosas (RESPEL) no pueden derivarse a recicladores convencionales
3	Derivar fracciones no peligrosas a gestores de reciclaje convencional autorizados por la CAR	Aluminio → recicladores de metales; vidrio → industria vidriera; cobre → recicladores de metales no ferrosos	Solicitar certificado de recepción y verificar licencia ambiental vigente del receptor
4	Gestionar las fracciones RESPEL (Si, polvo de celdas) con gestor autorizado para residuos peligrosos	Buscar gestor RESPEL habilitado por MADS en el SIUR, aunque no tenga experiencia específica en FV	Si no hay gestor disponible en la región: almacenamiento temporal certificado (máximo 12 meses, Decreto 4741 de 2005)
5	Documentar la ruta alternativa utilizada en el formulario de trazabilidad integral	Registrar: gestor receptor, tipo de ruta, fracción entregada, peso, fecha y certificado de recepción	La documentación de la ruta alternativa es evidencia de cumplimiento normativo ante la CAR o ANLA
6	Reportar al MADS a través del SIUR la imposibilidad de acceso a gestor FV específico	Diligenciar el reporte según la Ley 1672 de 2013 y la Política Nacional RAEE (MADS, 2015)	Este reporte contribuye a la actualización del diagnóstico de capacidad de gestores RAEE en Colombia

6. Control del proceso y trazabilidad de materiales

Para garantizar la gestión adecuada de residuos fotovoltaicos lo recomendable es implementar mecanismos de trazabilidad que permitan registrar las cantidades de materiales recuperados y su destino final dentro de procesos de reciclaje o valorización.

El seguimiento de estas corrientes de materiales permite:

- Evaluar la eficiencia del proceso de reciclaje
- Identificar oportunidades de mejora en la recuperación de materiales

- Garantizar la adecuada gestión ambiental de los residuos.

La implementación de esquemas de responsabilidad extendida del productor (REP) fortalece estos mecanismos de trazabilidad y control a lo largo de toda la cadena de gestión de residuos fotovoltaicos (Kabir et al., 2023; Ganesan & Valderrama, 2022).

El cierre de las brechas de infraestructura identificadas en este ajuste requiere la

actuación coordinada de múltiples actores del sistema: reguladores, financiadores, operadores y academia. La tabla siguiente sintetiza las acciones estructurales que cada actor debe impulsar para que la guía pueda implementarse en su versión más completa dentro del horizonte de mediano plazo (2030–2035), en coherencia con la ENEC (MADS/MinCIT, 2019) y los compromisos del país en materia de economía circular y transición energética.

Tabla 86. Actores responsables e instrumentos de política para el cierre de brechas de infraestructura FV en Colombia

Actor responsable	Acción estructural requerida	Resultado esperado	Instrumento de política aplicable
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)	Actualizar el Decreto 284 de 2018 para incluir módulos FV como categoría específica de RAEE con requisitos diferenciados de infraestructura.	Marco regulatorio específico para residuos FV que incentive la inversión en infraestructura especializada.	Estrategia Nacional de Economía Circular (2019); Ley 1672 de 2013; Decreto 284 de 2018.
Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT)	Incluir el reciclaje de módulos FV en los programas de financiamiento verde (Bancóldex, iNNpulsa) como apuesta de economía circular del sector energético.	Acceso a financiamiento para gestores RAEE medianos que quieran invertir en equipos especializados.	ENEC (MADS/MinCIT, 2019); Ley 2099 de 2021 (transición energética).
Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) / MinEnergía	Incluir en el Plan de Expansión de Generación el estimativo de residuos FV a 2030 y 2040, con escenario de demanda de infraestructura de reciclaje.	Señal de mercado para que el sector privado invierta en plantas de reciclaje anticipando el volumen futuro de residuos.	UPME (2025); Ley 1715 de 2014; Ley 2099 de 2021.
Gestores RAEE y empresas recicladoras	Explorar modelos de consorcio o alianza para acceder a equipos compartidos de trituración y separación, distribuyendo costos de inversión entre varios operadores.	Viabilidad económica del tratamiento de módulos FV para gestores de pequeña y mediana escala.	Decreto 284 de 2018; Política Nacional RAEE (MADS, 2015).
Academia e institutos de investigación (Universidad EAN, SENA, universidades técnicas)	Desarrollar programas de formación de operarios en tratamiento de residuos FV y protocolos de seguridad para manejo de RESPEL de módulos.	Capital humano capacitado para operar infraestructura de reciclaje FV a medida que se desarrolle.	Ley 2099 de 2021; Ley 1715 de 2014.

Nota. Elaborada con base en la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019), la Ley 2099 de 2021, el Decreto 284 de 2018 y la Política Nacional RAEE (MADS, 2015).

💡 Alineación con la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC): La Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS/MinCIT, 2019) establece metas de aprovechamiento de materiales en los sectores productivos colombianos. El reciclaje de módulos fotovoltaicos contribuye a tres de sus cinco ejes: flujos de materiales (Eje 2), nuevos modelos de negocio circulares (Eje 5) y producción y consumo sostenibles (Eje 1). La presente guía constituye un instrumento técnico de apoyo para la implementación de la ENEC en el sector de energías renovables.

7. Salida de la fase

Al finalizar esta fase, los materiales provenientes del reciclaje de módulos fotovoltaicos deben haberse clasificado y direccionado hacia sus respectivos procesos de reciclaje o valorización, a través de los agentes institucionales y gestores debidamente autorizados. Este numeral atiende tres aspectos: (a) cuáles son los agentes de gobierno responsables, (b) en qué lugares concretos de Colombia operan, y (c) la descomposición del módulo y la disposición final por fracción.

7.1. Agentes institucionales que regulan y ejecutan la disposición final

En Colombia, la disposición final de residuos fotovoltaicos opera bajo una cadena institucional de cuatro niveles. Los dos primeros son agentes de gobierno que habilitan y supervisan; los dos últimos ejecutan operativamente:

Tabla 87. Agentes institucionales involucrados en la gestión de residuos de paneles solares fotovoltaicos

Agente institucional	Nivel	Cobertura	Rol en disposición final de FV
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)	Nacional	Nacional	Formula la política RAEE y los criterios técnicos de gestión. Administra el SIAC. No ejecuta directamente — habilita y regula el sistema. Web: www.minambiente.gov.co
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)	Nacional	Nacional	Expide licencias ambientales a gestores RAEE de impacto nacional. Mantiene el registro de operadores habilitados. Verificar en: www.anla.gov.co → Trámites → Registro de Operadores.
CAR (Cundinamarca / Bogotá)	Regional	Bogotá D.C. y Cundinamarca	Autoriza gestores RAEE locales en la región central. Principal autoridad para residuos FV de instalaciones en la sabana de Bogotá.
CORANTIOQUIA / AMVA	Regional	Antioquia / Medellín	Autoriza y vigila gestores RAEE en Antioquia. La región tiene varios gestores activos (LITO, otros).
CVC	Regional	Valle del Cauca / Cali	Autoriza gestores RAEE en el Valle del Cauca. Cali tiene gestores que pueden recibir módulos FV.
CDMB	Regional	Santander / Bucaramanga	Autoriza gestores en el área metropolitana de Bucaramanga.
CORMACARENA	Regional	Meta / Villavicencio	Región de alta expansión FV (proyectos solares en los Llanos). Autoriza gestores locales.
CARDIQUE	Regional	Bolívar / Cartagena	Región de alta radiación solar y proyectos FV costeros. Autoriza gestores en la región Caribe.

Nota. Elaboración propia con base en la Ley 1672 de 2013, el Decreto 284 de 2018, el Decreto 4741 de 2005 y el directorio de CARs del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2024).

⚠ Obligación del generador: Quien retira los módulos (instalador, empresa EPC o propietario) debe entregar los residuos a un gestor con licencia vigente y conservar el certificado de disposición final. No está permitido disponer en rellenos sanitarios convencionales ni en chatarrerías no autorizadas (Decreto 4741 de 2005).

7.2. Lugares y gestores disponibles en Colombia

La siguiente tabla presenta los principales gestores RAEE autorizados y los canales

industriales disponibles por región. Se recomienda verificar la vigencia de cada licencia en www.anla.gov.co antes de realizar cualquier entrega.

Tabla 88. Principales gestores RAEE autorizados en Colombia

Gestor / Operador privado	Ciudad	Cobertura	Tipo de residuo y observación
LITO Ambiental S.A.S.	Bogotá D.C.	Nacional	Gestor RAEE certificado. Recibe equipos electrónicos y componentes metálicos. Apto para módulos FV — verificar capacidad por lote con la empresa.
ComputeC — Recycling SAS	Bogotá D.C.	Bogotá y región central	RAEE con metales pesados; cables y conectores. Verificar si acepta módulos FV según tamaño del lote.
LITO Ambiental (planta Medellín)	Medellín	Antioquia y Eje Cafetero	Equipos eléctricos y electrónicos industriales. Consultar para residuos FV de proyectos solares en la región.
CICLO Ambiental S.A.S.	Cali	Valle del Cauca y sur	RAEE; metales no ferrosos; residuos industriales. Verificar habilitación con CVC.
RECICLAMOS S.A.	Barranquilla	Costa Atlántica	Residuos sólidos industriales; RAEE liviano. Verificar con DAMAB / CSB.
PELDAR / Ardeca	Bogotá / Cali / Medellín	Nacional	Industria vidriera. Recibe vidrio plano secundario. Contacto comercial directo para vidrio de módulos FV.
Fundiciones de aluminio certificadas	Bogotá / Medellín / Cali	Nacional	Chatarra de aluminio (marcos FV). Canal con mercado activo. Gestores registrados ante CAR local.
Gestores regionales Meta / Caribe	Villavicencio / Cartagena	Regional	Zonas con alta actividad FV. Consultar directamente con CORMACARENA / CARDIQUE para gestores habilitados.

Nota. Elaboración propia con base en el Registro Único de Gestores de Residuos del MADS (SIUR, 2024) y el directorio de operadores habilitados de la ANLA. Los gestores mencionados son referenciales; verificar habilitación específica para módulos FV antes de entregar materiales.

7.3. Descomposición del módulo FV y disposición final por fracción

La siguiente tabla resume la composición típica en masa de un módulo FV de silicio

cristalino (c-Si), la ruta de disposición final recomendada para cada fracción, el canal de valorización disponible en Colombia, los agentes responsables y la clasificación RESPEL según el Decreto 4741 de 2005.

Tabla 89. Resumen de materiales y canales de disposición en Colombia

Fracción / Material	% masa	Disposición final recomendada	Canal en Colombia	Agente(s) responsable(s)	RESPEL
Vidrio templado (frente)	65–70 %	Reciclaje en industria vidriera o triturado como agregado en construcción	PELDAR, Ardeca; empresas de materiales de construcción	Gestor RAEE → Industria vidriera. CAR / ANLA supervisan al gestor	No peligroso
Marco de aluminio	10–15 %	Venta a chatarrera o fundición de aluminio secundario	Fundiciones (Alumina S.A.S., recicladores certificados); perfilería secundaria	Instalador EPC o Gestor RAEE → Fundición. Reportar a CAR local	No peligroso
Celdas de silicio cristalino	3–5 %	Envío a gestor RAEE con capacidad de recuperación; largo plazo: procesos pirometalúrgicos	Mercado internacional de silicio; gestores RAEE nacionales especializados (mediano plazo)	Gestor RAEE autorizado (ANLA). MADS supervisa el sistema RAEE	Peligroso (plomo en soldaduras)
Encapsulante EVA	6–8 %	Co-incineración con recuperación energética en hornos de cemento autorizados	Argos, Cementos Tequendama, LaFarge (coprocesamiento industrial)	Gestor RAEE → Cementera con licencia de coprocesamiento. ANLA supervisa la cementera	No peligroso
Backsheet (PVF/PET)	5–8 %	Celda de seguridad si no hay reciclador; preferir co-incineración en cementera	Rellenos de seguridad autorizados; cementeras como combustible alternativo	Gestor RAEE → Celda de seguridad autorizada por ANLA o CAR. Certificado obligatorio	Verificar caso a caso
Cables DC y conectores (Cu/Ag)	1–2 %	Envío a chatarrera certificada para recuperación de cobre y plata	Chatarrerías y refinерías de cobre; mercado de metales preciosos para plata	Instalador / Gestor RAEE → Chatarrera certificada. Registro ante CAR local	No peligroso
Junction box (plástico + eléctricos)	~1 %	Gestión como RAEE: entrega a gestor licenciado para segregación de metales y plástico	Gestores RAEE (recuperación de metales de tarjeta); reciclaje de plástico si viable	Gestor RAEE autorizado (ANLA o CAR). MADS supervisa el sistema RAEE	Peligroso (diodos, soldaduras)
Pastas y tintas metálicas (Ag, Pb)	< 1 %	Tratamiento como RESPEL (plomo); recuperación de plata en gestores especializados	Industria de metales preciosos (plata); control ambiental estricto de plomo	Gestor RAEE con licencia RESPEL. ANLA expide; CAR supervisa regionalmente	PELIGROSO (plomo, cadmio)

Nota. Porcentajes en masa basados en Li et al. (2024), IEA-PVPS (2021) y Mahmoudi et al. (2021). Los valores son referenciales; varían según fabricante y año de producción. Verificar clasificación RESPEL en el Decreto 4741 de 2005 y sus actualizaciones. Los canales de valorización son referenciales; consultar disponibilidad con el gestor RAEE autorizado.

Marco normativo aplicable: Decreto 4741 de 2005 el cual define residuos peligrosos y obliga su entrega a gestores licenciados, la ley 1672 de 2013 Política Nacional RAEE que establece responsabilidad extendida del productor y esquemas de posconsumo, el decreto 284 de 2018 que reglamenta la gestión RAEE: productores, gestores, obligaciones de reporte y programas posconsumo, la ley 2099 de 2021 Transición energética, la cual introduce obligación de gestión posconsumo de componentes de sistemas de energía renovable, incluidos módulos FV; y por último aunque no menos importante, ñps Onjetivos de Desarrollo Sostenible ODS 7, 12 y 13 Marcos internacionales: energía asequible, producción y consumo responsables, acción climática. Cuando el generador deba recurrir a rutas transitorias de gestión por ausencia de gestor RAEE con capacidad específica

para módulos FV, deberá documentar esta circunstancia en el formulario de trazabilidad integral, indicando el canal alternativo utilizado, el gestor receptor, las fracciones entregadas y la razón por la que no fue posible acceder a la ruta principal. Esta documentación constituye la evidencia de diligencia razonable ante la autoridad ambiental competente (CAR o ANLA) y es coherente con el espíritu de la Política Nacional RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), que reconoce el carácter transitorio de las brechas de cobertura del sistema y promueve la participación activa de generadores y gestores en su superación progresiva (Ganesan & Valderrama, 2022; Kabir et al., 2023).

Indicadores de cumplimiento: Los siguientes criterios permiten verificar la correcta ejecución de esta fase:

Tabla 90. Indicadores cumplimiento fase 6

Indicadores de cumplimiento		Evidencia verificable
☐	Cada fracción recuperada fue clasificada y direccionada hacia su ruta de valorización correspondiente.	Formulario de trazabilidad con fracción, peso, destino y gestor receptor
☐	Aluminio y vidrio entregados a gestores autorizados de reciclaje de metales y vidrio respectivamente.	Certificados de recepción del gestor o chatarrera destinataria
☐	Residuos peligrosos (celdas, JB, pastas metálicas) entregados a gestor RAEE con licencia ANLA o CAR vigente.	Copia de licencia ambiental del gestor + manifiesto de residuos peligrosos (RESPEL)
☐	Residuos finos y fracciones no recuperables gestionados en celda de seguridad autorizada.	Certificado de disposición final del operador de la celda de seguridad
☐	Registro de trazabilidad implementado con cantidades por fracción y destino final.	Registro interno + reporte a la CAR competente si supera umbrales RESPEL
☐	Proceso completo desvió de disposición final al menos el 80 % en masa del módulo tratado.	Cálculo: suma de fracciones valorizadas / masa total del módulo $\geq 0,80$

Nota. Elaboración propia. El certificado de disposición final emitido por el gestor RAEE es el documento que acredita el cumplimiento normativo. Conservar durante al menos 5 años (Decreto 4741 de 2005).

Responsable: _____

Fecha de cierre: _____

Firma: _____

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artículos científicos y reportes técnicos

Ansanelli, G., Fais, G., Marengo, G., Temporiti, M. E., Spagni, A., & Bonomi, T. (2021). A recovery process for silicon from end-of-life photovoltaic panels. *Energies*, 14(1), 218.

<https://doi.org/10.3390/en14010218>

Bošnjaković, M., Stojkov, M., & Jurić, B. (2023). Processing of photovoltaic panels at end of life. *Processes*, 11(3), 854. <https://doi.org/10.3390/pr11030854>

Bulińska, S., Bula, K., & Bulinski, Z. (2025). Recycling of photovoltaic panels — current state and future prospects. *Energies*, 18(1), 112. <https://doi.org/10.3390/en18010112>

Das, S., & Sarmah, A. K. (2025). End-of-life photovoltaic panel management: A systematic review of recycling pathways, policy frameworks, and circular economy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144512.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144512>

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2022). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>

Dias, P., Schmidt, L., Chang, N. L., Lunardi, M., Hao, X., & Hallam, B. (2021). Evaluating the end-of-life of silicon solar cells by physicochemical treatment and economic analysis. *Energies*, 14(21), 6997. <https://doi.org/10.3390/en14216997>

Diez-Suarez, A. M., González-Martínez, A., & de la Torre-Rodríguez, N. (2024). Review of end-of-life management of photovoltaic modules: Towards circular economy. *Energies*, 17(23), 6015. <https://doi.org/10.3390/en17236015>

Ganesan, K., & Valderrama, C. (2022). Assessment of end-of-life management pathways for solar photovoltaic panels in Colombia. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106387>

Gahlot, R., Bhakar, V., & Samdarshi, S. K. (2022). An overview of emerging technologies and innovations for end-of-life solar photovoltaic panel recycling. *Energy for Sustainable Development*, 70, 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.07.013>

IEA-PVPS. (2021). *End-of-life management of photovoltaic panels: Trends in PV module recycling technologies* (Report IEA-PVPS T12-10:2018, updated 2021). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://iea-pvps.org>

International Energy Agency. (2025). *Renewables 2025: Analysis and forecast to 2030*. IEA. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>

Kabir, E., Kim, K. H., & Szulejko, J. E. (2023). Social impacts of solar home systems in rural areas: A case study in Bangladesh. *Energies*, 16(2), 672.

<https://doi.org/10.3390/en16020672>

Li, J., Zhu, Q., Xu, X., & Liu, H. (2024). End-of-life management of solar photovoltaic panels: A review of strategies, challenges, and emerging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113914>

Lim, J., Park, J., & Lee, J. (2022). Recovery of valuable materials from end-of-life photovoltaic modules through mechanical and thermal treatment processes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 238, 111624. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111624>

Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2021). Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105277>

Mao, W., Li, J., Wang, S., & Gu, W. (2024). End-of-life silicon photovoltaic panel management: Challenges, policies and recycling technologies. *Journal of Environmental Management*, 354, 120248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120248>

Normas técnicas internacionales

American National Standards Institute / International Safety Equipment Association. (2020). *ANSI/ISEA Z87.1-2020: American national standard for occupational and educational personal eye and face protection devices*. ISEA.

European Committee for Standardization. (2004). *EN 12195-2: Load restraining on road vehicles — Safety — Part 2: Web lashing made from man-made fibres*. CEN.

International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 60900:2018: Live working — Hand tools for use up to 1 000 V AC and 1 500 V DC* (4.^a ed., con corrigenda COR1:2019 y COR2:2020). IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/27266>

International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 62446-1:2016+A1:2018: Photovoltaic (PV) systems — Requirements for testing, documentation and maintenance — Part 1: Grid connected systems — Documentation, commissioning tests and inspection* (ed. consolidada). IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/22275>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *NTC 1523: Cascos de seguridad industrial*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *NTC 2037: Arneses de seguridad. Requisitos*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). *NTC 2775: Residuos sólidos. Terminología*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). *NTC 2396: Calzado de protección. Requisitos y métodos de ensayo* (3.^a actualización). ICONTEC.

International Organization for Standardization. (2003). *ISO 6780:2003: Flat pallets for intercontinental materials handling — Principal dimensions and tolerances*. ISO. <https://www.iso.org/standard/36079.html>

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015: Quality management systems — Requirements* (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/62085.html>

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015: Environmental management systems — Requirements with guidance for use* (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/60857.html>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018: Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use* (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/63787.html>

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 13997:2024: Protective clothing — Mechanical properties — Determination of resistance to cutting by sharp objects*. ISO. <https://www.iso.org/standard/89073.html>



International Organization for Standardization / Commission Internationale de l'Éclairage. (2025). *ISO/CIE 8995-1:2025: Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor*. ISO/CIE. <https://www.iso.org/standard/76342.html>

National Institute for Occupational Safety and Health. (1996). *NIOSH guide to the selection and use of particulate respirators certified under 42 CFR 84* (DHHS/NIOSH Publication No. 96-101). CDC/NIOSH. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-101>

Normativa colombiana

Colombia, Congreso de la República. (2013). *Ley 1672 de 2013: Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Diario Oficial N.º 48857.

Colombia, Congreso de la República. (2014). *Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Diario Oficial N.º 49150.

Colombia, Congreso de la República. (2021). *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética*. Diario Oficial N.º 51753.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 4741 de 2005: Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Diario Oficial N.º 46137.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Política nacional para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. MADS.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. MADS.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Decreto 284 de 2018: Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos — RAEE*. Diario Oficial N.º 50525.

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas — RETIE. Diario Oficial N.º 52.716. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-instalaciones-el%C3%A9ctricas-retie/>

Colombia, Ministerio de Salud y Trabajo. (2019). Resolución 0312 de 2019: Por la cual se definen los estándares mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. Ministerio de Salud y Trabajo.

Colombia, Ministerio de Trabajo. (1979). Resolución 2400 de 1979: Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo (Estatuto de Seguridad Industrial). Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Colombia, Ministerio de Transporte. (2002). *Decreto 1609 de 2002: Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera*. Diario Oficial N.º 44893.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Atlas climatológico de Colombia. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co>



Unidad de Planeación Minero Energética. (2025). *Plan de expansión de referencia — Generación y transmisión 2025*. UPME. <https://www.upme.gov.co>