Presentación
Capítulo 1. Los Sistemas Fotovoltaicos

1.1 Componentes y Funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos

- 1.1.1 Descripción general del sistema
- 1.1.2 Componentes principales
- 1.1.3 Funcionamiento del sistema
- 1.1.4 Consideraciones operativas

1.2 Materias Primas para la Fabricación de Sistemas Fotovoltaicos

- 1.2.1 Principales materiales
- 1.2.2 Cadena de suministro y sus implicaciones

1.3 Clasificación de Materiales según Nivel de Peligrosidad

- 1.3.1 Materiales no peligrosos
- 1.3.2 Materiales potencialmente peligrosos
- 1.3.3 Materiales peligrosos

1.4 Subsistemas Constitutivos del Sistema Fotovoltaico

- 1.4.1 Subsistema de Generación
- 1.4.2 Subsistema de Conversión y Control
- 1.4.3 Subsistema de Almacenamiento Energético
- 1.4.4 Subsistema de Conducción y Protección Eléctrica
- 1.4.5 Subsistema Estructural
- 1.4.6 Subsistema BOS (Balance of System)

1.5 Implicaciones para el Transporte

- 1.5.1 El transporte como eslabón crítico
- 1.5.2 Características técnicas que condicionan el transporte
- 1.5.3 Condicionantes territoriales en el contexto colombiano
- 1.5.4 Tipología general de riesgos asociados al transporte

1.6 Marco Normativo General Aplicable al Transporte

1.7 Síntesis del Capítulo

Capítulo 2. Análisis de Rutas y Tipologías de Transporte de Materiales

- 2.1 Vías de Primer y Segundo Orden
- 2.2 Vías de Tercer Orden
- 2.3 Caminos Rurales de Herradura y Peatonales
- 2.4 Vías Fluviales

- 2.5 Vías Marítimas Costeras *(pendiente)*

Capítulo 3. Riesgos Asociados al Transporte

- 3.1 Durante la Importación y Nacionalización
- 3.2 Durante el Almacenamiento y Planificación Logística
- 3.3 Durante el Transporte Primario
- 3.4 Durante el Transporte Secundario
- 3.5 Durante el Desmantelamiento y Disposición Final
- 3.6 Durante los Almacenamientos Temporales

Capítulo 4. Normativa Asociada al Transporte

- 4.1 Normativa Internacional
- 4.2 Normativa Nacional
- 4.3 Retos Normativos

Capítulo 5. Medidas para la Prevención y Atención de Riesgos *(pendiente)*

Bibliografía

PRESENTACIÓN

El presente documento constituye el Protocolo de Transporte del programa Colombia Solar, iniciativa estratégica del Ministerio de Minas y Energía orientada a la implementación masiva de sistemas fotovoltaicos como parte de la diversificación de la matriz energética nacional. Su propósito es establecer los lineamientos técnicos, operativos y normativos que deben regir el transporte de los componentes de estos sistemas, desde su punto de importación hasta el sitio de instalación en las comunidades beneficiarias, así como la gestión logística de los residuos generados al final de su ciclo de vida.

El protocolo responde a una necesidad concreta: el transporte de sistemas fotovoltaicos en el contexto colombiano no es una actividad logística convencional. La diversidad territorial del país, la heterogeneidad de su infraestructura vial y la complejidad de los corredores de acceso a las zonas rurales donde se concentra la implementación del programa generan un entorno logístico de alta exigencia, en el cual las decisiones sobre embalaje, manejo, rutas y condiciones de transporte tienen consecuencias directas sobre la integridad de los equipos, la seguridad del personal, el impacto ambiental de la operación y, en última instancia, la sostenibilidad del programa.

El documento se estructura en cinco capítulos que abordan progresivamente los distintos aspectos del sistema logístico: una caracterización técnica de los sistemas fotovoltaicos y sus implicaciones para el transporte; un análisis de las rutas y tipologías de vía relevantes para el programa; una evaluación de los riesgos asociados al transporte según la etapa de la cadena logística; el marco normativo aplicable; y las medidas de prevención, control y atención de riesgos. Esta estructura responde a la lógica del sistema, no de los componentes aislados, reconociendo que una gestión logística responsable requiere comprender la cadena completa y no únicamente sus eslabones individuales.

CAPÍTULO 1. LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

En el marco de la transición energética que adelanta Colombia, los sistemas fotovoltaicos han adquirido un rol estratégico en la diversificación de la matriz energética nacional, particularmente en regiones con alta disponibilidad de recurso solar como la región Caribe y la Orinoquía. Esta transición no responde únicamente a compromisos ambientales y de sostenibilidad climática, sino también a la necesidad estructural de reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional frente a fenómenos hidrometeorológicos que afectan de manera recurrente la generación hidráulica. La variabilidad climática asociada a los fenómenos de El Niño y La Niña ha evidenciado, en múltiples ciclos, la fragilidad de un sistema con dependencia predominante de la generación hídrica, condición que hace imperativa la incorporación progresiva de fuentes con perfil de generación complementario.

En este contexto, el programa Colombia Solar representa un esfuerzo institucional orientado a escalar la implementación de sistemas fotovoltaicos como parte de una política energética con vocación territorial. Sin embargo, la sostenibilidad de ese esfuerzo depende en buena medida de la calidad con que se gestionen las etapas previas a la operación, entre las cuales el transporte ocupa un lugar determinante. Un sistema fotovoltaico que llega dañado a su destino no es simplemente un activo deteriorado: es un punto de falla que se traslada a la fase operativa de forma silenciosa, afectando la generación esperada, la vida útil del equipo y, con ello, la percepción de las comunidades beneficiarias sobre la viabilidad de la energía solar.

El presente capítulo tiene como propósito establecer una comprensión integral de los sistemas fotovoltaicos desde una perspectiva técnica y sistémica, abordando sus componentes, funcionamiento, materias primas, subsistemas constitutivos y las características que condicionan su transporte. Este análisis no pretende agotar la discusión sobre riesgos —cuestión que será desarrollada en profundidad en el Capítulo 3—, sino sentar las bases conceptuales y técnicas que permitan fundamentar las decisiones logísticas y operativas que constituyen el núcleo del presente protocolo.

1.1 Componentes y Funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos

1.1.1 Descripción general del sistema

Un sistema fotovoltaico es un conjunto integrado de componentes diseñados para convertir la radiación solar en energía eléctrica utilizable mediante el efecto fotovoltaico, fenómeno por el cual determinados materiales semiconductores generan una diferencia de potencial eléctrico al ser expuestos a la radiación electromagnética del espectro solar. Lejos de ser una tecnología monolítica, el sistema fotovoltaico debe entenderse como una arquitectura funcional en la que la eficiencia global y la confiabilidad operativa

dependen de la interacción precisa entre sus distintos componentes. La falla o degradación de cualquiera de ellos no solo afecta la generación individual, sino que puede comprometer el desempeño del conjunto.

Esta naturaleza sistémica tiene implicaciones directas sobre la logística de transporte: no se movilizan componentes individuales de forma independiente, sino partes de un sistema cuya integridad debe preservarse en cada etapa del proceso. Comprender esta integralidad es el punto de partida para dimensionar correctamente los requerimientos del presente protocolo.

1.1.2 Componentes principales

Los sistemas fotovoltaicos están conformados por un conjunto de elementos de naturaleza diversa —eléctrica, electrónica, estructural y de protección— cuya articulación define la capacidad de generación y la resiliencia operativa del sistema.

Los módulos fotovoltaicos constituyen la unidad básica de generación. Están compuestos por celdas solares de material semiconductor, generalmente silicio en sus distintas configuraciones cristalinas, encapsuladas entre capas de vidrio templado y polímeros protectores que garantizan su estanqueidad y resistencia ambiental. Su función es capturar la radiación solar y transformarla en corriente eléctrica continua, razón por la cual su integridad física —incluyendo la de sus capas de encapsulación— es determinante para el desempeño energético a largo plazo. Los módulos son, a su vez, los componentes de mayor fragilidad relativa dentro del sistema, lo que los convierte en el elemento de mayor atención durante el transporte.

Los inversores son los equipos encargados de transformar la corriente continua generada por los módulos en corriente alterna compatible con la red eléctrica o con los equipos de consumo. Su sofisticación electrónica los hace sensibles a impactos físicos, variaciones térmicas bruscas y condiciones de humedad. Dependiendo de la arquitectura del sistema, estos equipos pueden ser de tipo centralizado, en cadena (string) o de microinversores, cada uno con requerimientos de manejo diferenciados.

Las estructuras de soporte son los sistemas mecánicos que garantizan la correcta instalación, orientación e inclinación de los módulos, asegurando su estabilidad frente a cargas de viento, peso propio y variaciones térmicas. Generalmente fabricadas en aluminio o acero galvanizado, estas estructuras presentan riesgo de deformación geométrica si son sometidas a presiones o apilamiento inadecuado durante el transporte, comprometiendo su ensamblaje en sitio.

Los sistemas de cableado, conectores y protecciones eléctricas —incluyendo interruptores, fusibles, protecciones de sobretensión y sistemas de puesta a tierra— constituyen la red de conducción y seguridad del sistema. Aunque son componentes de menor volumen individual, su correcto embalaje y protección durante el transporte es crítico, ya que daños en conectores o aislamientos pueden derivar en fallas eléctricas de difícil diagnóstico en campo. Por último, los sistemas de monitoreo y control facilitan el seguimiento en

tiempo real del desempeño del sistema y la detección temprana de fallas, siendo componentes electrónicos que requieren condiciones de transporte similares a las de equipos de precisión.

1.1.3 Funcionamiento del sistema

El proceso de generación eléctrica en un sistema fotovoltaico se desarrolla como una cadena de transformaciones energéticas secuenciales. La radiación solar incide sobre las celdas fotovoltaicas, provocando la excitación de electrones en el material semiconductor y generando así una corriente continua proporcional a la irradiancia disponible. Esta energía es conducida a través del sistema de cableado hacia el inversor, donde se transforma en corriente alterna con las características de tensión y frecuencia requeridas para su uso. La energía resultante puede ser consumida directamente en el punto de generación, almacenada en sistemas de baterías para uso diferido, o inyectada a la red eléctrica cuando existe interconexión.

Este proceso está condicionado por factores externos de naturaleza climática —radiación solar disponible, temperatura ambiente, nubosidad y fenómenos de sombreado— que introducen una variabilidad inherente en la generación. En el contexto colombiano, esta variabilidad se ve amplificada por la influencia de los fenómenos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), que pueden modificar significativamente los patrones de irradiación solar en distintas regiones del país. Esta condición refuerza la importancia de que los sistemas lleguen a su destino en óptimas condiciones, pues cualquier pérdida de eficiencia derivada del transporte se suma a la variabilidad climática propia del emplazamiento.

1.1.4 Consideraciones operativas

Los sistemas fotovoltaicos presentan un conjunto de características operativas que deben ser internalizadas desde las etapas previas a la instalación. Su dependencia de las condiciones climáticas y la variabilidad intrínseca de su generación exigen que los componentes lleguen al sitio de instalación sin degradación previa, de modo que el sistema pueda operar dentro de los rangos de eficiencia proyectados. La sensibilidad a fallas físicas y eléctricas —muchas de las cuales no son detectables a simple vista— implica que el daño en transporte puede manifestarse como una pérdida silenciosa de rendimiento que solo se hace evidente meses después de la puesta en marcha.

Adicionalmente, la necesidad de condiciones adecuadas de instalación y mantenimiento supone que los equipos deben llegar no solo íntegros, sino debidamente identificados, organizados y con su documentación técnica completa. Estas condiciones tienen implicaciones directas sobre los procedimientos de embalaje, estiba, manejo y verificación que se desarrollan en los capítulos siguientes del presente protocolo.

1.2 Materias Primas para la Fabricación de Sistemas Fotovoltaicos

1.2.1 Principales materiales

La fabricación de sistemas fotovoltaicos involucra una cadena de materiales de diversa naturaleza física, química y funcional. El silicio es el material base predominante para la fabricación de celdas solares, presente en sus formas monocristalina y policristalina según la tecnología del módulo. El vidrio templado de alta transmitancia actúa como capa protectora frontal, proporcionando resistencia mecánica y transparencia óptica al conjunto. El aluminio se emplea tanto en los marcos estructurales de los módulos como en las estructuras de soporte, siendo el metal estructural dominante por su relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión.

En el plano de la conducción eléctrica, el cobre es el material principal de los sistemas de cableado, mientras que la plata se utiliza en los contactos eléctricos de las celdas, dada su alta conductividad. Los polímeros —principalmente el etilvinilacetato (EVA) como encapsulante y los materiales de backsheet— cumplen funciones de protección y aislamiento, siendo altamente sensibles a condiciones de temperatura extrema, humedad y exposición ultravioleta. En tecnologías específicas, como los módulos de telururo de cadmio (CdTe) o di-seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), se emplean metales pesados como cadmio, plomo o selenio, cuya presencia introduce requerimientos regulatorios adicionales tanto en el manejo como en el transporte y la disposición final.

1.2.2 Cadena de suministro y sus implicaciones

La mayoría de estos materiales proviene de cadenas de suministro internacionales con alta concentración geográfica, lo que implica dependencias estructurales que inciden en la disponibilidad, los costos y los tiempos de reposición. China concentra actualmente más del 80% de la producción mundial de módulos fotovoltaicos y una proporción significativa del procesamiento de silicio, lo que somete al programa Colombia Solar a fluctuaciones de mercado global que escapan al control nacional. Esta dependencia adquiere especial relevancia en un programa de despliegue masivo como el que se describe, pues los tiempos de reposición de componentes dañados pueden comprometer cronogramas de instalación y compromisos contractuales.

Desde la perspectiva del protocolo de transporte, la diversidad de materiales implica requerimientos diferenciados de manipulación, embalaje, almacenamiento y disposición final. No todos los componentes admiten las mismas condiciones de apilamiento, exposición térmica o manejo mecánico, y una gestión logística que trate el envío como una carga homogénea introduce riesgos innecesarios sobre componentes de alta sensibilidad.

1.3 Clasificación de Materiales según Nivel de Peligrosidad

La diversidad de materiales presentes en los sistemas fotovoltaicos exige una clasificación funcional desde el punto de vista de su peligrosidad potencial, tanto para las personas involucradas en el transporte como para el entorno ambiental. Esta clasificación no es meramente académica: tiene implicaciones directas sobre los requerimientos de embalaje, señalización, documentación y capacitación del personal logístico.

1.3.1 Materiales no peligrosos

Esta categoría comprende materiales como el vidrio templado, el aluminio y el silicio en estado sólido, cuyo riesgo principal está asociado al daño físico —fractura, deformación, abrasión— más que a efectos tóxicos o ambientales. Aunque no generan riesgos de contaminación, su fragilidad estructural los hace particularmente vulnerables a condiciones de embalaje deficiente o manipulación inadecuada, con consecuencias directas sobre la integridad funcional del sistema.

1.3.2 Materiales potencialmente peligrosos

Los polímeros de encapsulación (EVA, backsheet) y los componentes electrónicos complejos constituyen esta categoría intermedia. Su peligrosidad se activa bajo condiciones específicas: temperatura extrema, exposición prolongada a radiación ultravioleta o situaciones de incendio, en las cuales pueden emitir gases y compuestos de combustión con efectos sobre la salud. Durante el transporte convencional su riesgo es moderado, pero debe considerarse la posibilidad de condiciones extremas en trayectos largos bajo alta exposición solar —frecuentes en la región Caribe colombiana—, que pueden acelerar la degradación de materiales poliméricos incluso antes de la instalación.

1.3.3 Materiales peligrosos

Los metales pesados presentes en tecnologías específicas —cadmio en módulos CdTe, plomo en soldaduras de celdas convencionales— configuran la categoría de mayor regulación. Su peligrosidad radica en la toxicidad sistémica y el potencial de contaminación ambiental en caso de ruptura o dispersión. El transporte de componentes que contienen estas sustancias se encuentra sujeto al Decreto 1609 de 2002 y a la normativa del Ministerio de Transporte, que establecen condiciones específicas de embalaje, etiquetado, señalización vehicular y documentación para el traslado de mercancías peligrosas en el territorio colombiano. El incumplimiento de estas disposiciones genera no solo responsabilidad legal para el operador logístico, sino riesgos ambientales de difícil mitigación posterior.

1.4 Subsistemas Constitutivos del Sistema Fotovoltaico

Para efectos del presente protocolo, resulta analíticamente necesario desagregar el sistema fotovoltaico en sus subsistemas constitutivos. Esta desagregación no obedece a una lógica puramente descriptiva, sino a un criterio funcional y logístico: cada subsistema tiene características físicas, de fragilidad y de requerimiento de manejo distintas, lo que determina tratamientos diferenciados durante el embalaje, el transporte y la recepción en sitio. Comprender el sistema como la articulación de subsistemas permite diseñar protocolos de manejo que respondan a la naturaleza específica de cada componente, en lugar de aplicar criterios genéricos que incrementan el riesgo de daño.

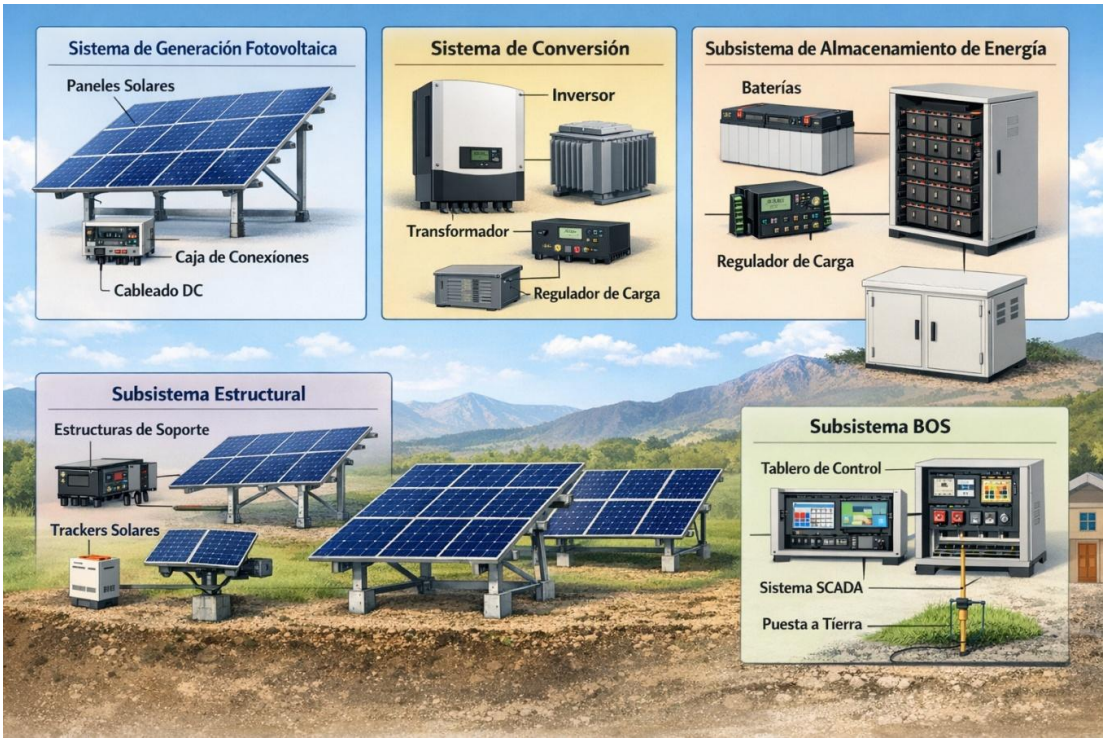


Figura 1. Componentes de los sistemas fotovoltaicos

La figura anterior ilustra la composición física de los principales componentes que integran un sistema fotovoltaico. Como puede observarse, la diversidad de elementos —módulos, inversores, estructuras, cableado, sistemas de almacenamiento y control— es la expresión visual de la complejidad sistémica que debe ser gestionada desde la etapa logística. Cada uno de estos componentes pertenece a un subsistema con características técnicas y requerimientos de manejo diferenciados, tal como se desarrolla en los apartados siguientes.

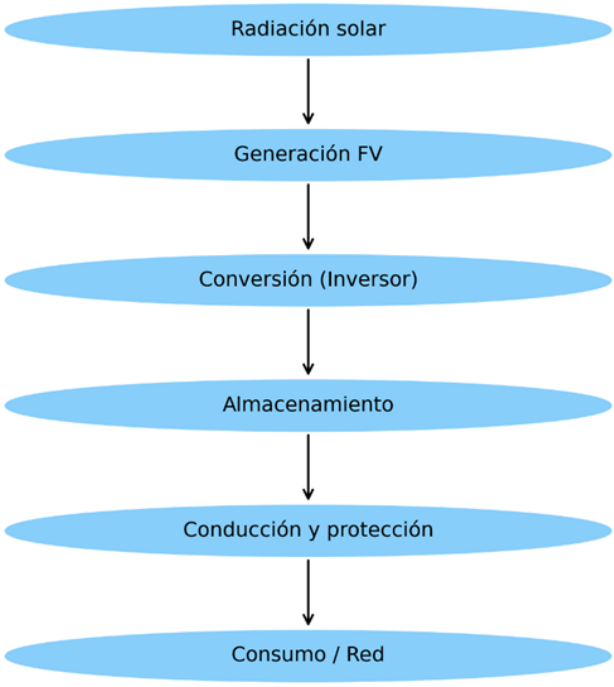


Figura 2. Estructura funcional de los sistemas fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia (2026)

La Figura 2 sintetiza el flujo funcional del sistema fotovoltaico, desde la captación de la radiación solar hasta su aprovechamiento final como energía consumible o inyectada a la red. El diagrama evidencia la interdependencia operativa entre subsistemas: la interrupción o degradación en cualquier punto de la cadena —ya sea en la generación, la conversión, el almacenamiento o la conducción— compromete el desempeño del sistema en su conjunto. Esta interdependencia es el argumento central que justifica un tratamiento logístico diferenciado por subsistema durante el transporte, y no una gestión homogénea de la carga.

1.4.1 Subsistema de Generación

Constituido por los módulos fotovoltaicos, es el núcleo funcional del sistema y, simultáneamente, el de mayor vulnerabilidad física durante el transporte. Los módulos combinan materiales de alta fragilidad —vidrio templado, celdas semiconductoras, encapsulantes poliméricos— en una estructura laminar que, aunque diseñada para soportar condiciones ambientales durante décadas de operación, es altamente susceptible a los esfuerzos mecánicos generados por vibraciones prolongadas, impactos puntuales y apilamiento inadecuado.

El riesgo más crítico asociado a este subsistema es la generación de microfracturas en las celdas solares: discontinuidades internas que no son visibles durante la inspección visual en campo, pero que se expresan

como pérdidas de potencia generativa de entre el 5% y el 30% dependiendo de su extensión y patrón. Este fenómeno —conocido como cracking celular— puede producirse por un único evento de impacto o por la acumulación de ciclos de vibración durante trayectos en vías con estado irregular, condición frecuente en los corredores logísticos que comunican los puertos del Caribe con zonas rurales de difícil acceso. Las celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino incorporan además contactos metálicos de plata y, en algunos casos, soldaduras con plomo, lo que implica que una fractura severa del módulo puede generar exposición a trazas de metales que deben gestionarse con los protocolos correspondientes.

1.4.2 Subsistema de Conversión y Control

Integrado por los inversores, reguladores de carga, controladores y sistemas de protección eléctrica, este subsistema concentra la mayor densidad tecnológica del sistema fotovoltaico. Sus componentes electrónicos de precisión —tarjetas de control, capacitores, inductores, transformadores de alta frecuencia— son sensibles a golpes, a variaciones térmicas bruscas y a la humedad. Un inversor sometido a impactos durante el transporte puede presentar fallas intermitentes de diagnóstico complejo, que requieren intervención técnica especializada para su identificación y corrección.

En sistemas de mayor escala, la presencia de transformadores con aceites dieléctricos introduce un factor de riesgo adicional: una fuga derivada de daño estructural durante el transporte puede generar contaminación del suelo en los puntos de cargue, descargue o almacenamiento temporal, con implicaciones ambientales y regulatorias. Desde el punto de vista logístico, este subsistema exige condiciones de embalaje equivalentes a las de equipos electrónicos industriales: amortiguación de impactos, control de humedad mediante desiccantes, identificación clara de orientación de carga y protección contra campos electromagnéticos cuando corresponda. Un inversor dañado puede inmovilizar un sistema completo hasta tanto se gestione su reemplazo, con los consecuentes efectos sobre cronogramas y compromisos de generación.

1.4.3 Subsistema de Almacenamiento Energético

En sistemas fotovoltaicos aislados o híbridos, el subsistema de almacenamiento —conformado generalmente por bancos de baterías de litio-hierro-fosfato (LiFePO4), ion-litio u otras tecnologías electroquímicas— introduce la mayor complejidad regulatoria del conjunto. Las baterías de ion-litio se clasifican en la Clase 9 (misceláneos peligrosos) bajo las designaciones UN 3480 y UN 3481, con requerimientos específicos de estado de carga (SOC), embalaje y documentación para su transporte terrestre.

El Battery Management System (BMS), componente central de control del subsistema, integra sensores, unidades de procesamiento y algoritmos que monitorean en tiempo real variables críticas como voltaje por

celda, corriente, temperatura y estado de carga. Su importancia desde la perspectiva del transporte radica en que un BMS dañado por impactos puede perder su capacidad de detección de condiciones críticas, facilitando la ocurrencia de eventos térmicos durante la operación posterior. Las baterías de ion-litio pueden experimentar fenómenos de fuga térmica (thermal runaway) ante condiciones de daño físico, cortocircuito interno o carga inadecuada, generando incendios de difícil extinción con emisión de gases tóxicos como fluoruro de hidrógeno. Este subsistema exige un tratamiento logístico completamente diferenciado del resto del sistema fotovoltaico, con procedimientos específicos que se desarrollarán en el capítulo de riesgos del presente protocolo.

1.4.4 Subsistema de Conducción y Protección Eléctrica

Comprende el cableado de corriente continua y alterna, los conectores tipo MC4, las cajas de combinación, los interruptores, fusibles, dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD) y los sistemas de puesta a tierra. A pesar de ser componentes de menor volumen y costo unitario, su correcto funcionamiento es indispensable para la seguridad y eficiencia del sistema. Los conectores MC4, en particular, son elementos cuya integridad física debe verificarse cuidadosamente: un conector deformado o con su sistema de enclavamiento comprometido puede generar arcos eléctricos durante la operación, con riesgo de incendio en la instalación.

Los SPD, basados en varistores o descargadores de gas, tienen una capacidad de absorción limitada y pueden fallar si son sometidos a impactos que alteren su calibración interna. El sistema de puesta a tierra, aunque no presenta riesgos en sí mismo durante el transporte, requiere que todos sus componentes —electrodos, conductores, conectores equipotenciales— lleguen al sitio en condiciones que garanticen resistencias de tierra dentro de los rangos exigidos por el RETIE. El cableado, por su parte, requiere protección frente a aplastamiento, doblado excesivo y exposición a temperaturas extremas: en trayectos bajo alta irradiación solar, la temperatura interior de un vehículo de carga cerrado puede alcanzar valores que aceleran la degradación de los aislamientos poliméricos.

1.4.5 Subsistema Estructural

Conformado por las estructuras de soporte, tornillería, fijaciones, anclajes y, cuando aplica, sistemas de seguimiento solar (trackers), este subsistema es el de menor fragilidad electrónica pero no el de menor riesgo logístico. Las estructuras de aluminio o acero galvanizado pueden sufrir deformaciones geométricas si son apiladas sin la distribución adecuada de cargas, o si quedan sujetas a presiones concentradas durante el transporte. Estas deformaciones pueden comprometer el ensamblaje en sitio, generar tensiones no previstas sobre los módulos instalados y dificultar el alineamiento correcto del sistema.

Los trackers, al incorporar actuadores, motores, sensores y sistemas de control electromecánico, combinan la fragilidad de los componentes electrónicos con la robustez de las estructuras metálicas, lo que exige un embalaje que atienda simultáneamente ambas características. La pérdida o mezcla de elementos de fijación —tornillos de especificación particular, perfiles de ensamble, piezas de anclaje— puede detener el proceso de instalación de manera imprevista en zonas rurales donde la consecución de repuestos implica tiempos y costos significativos. Este riesgo, frecuentemente subestimado en la planificación logística, debe ser gestionado desde el empaque y la organización del envío mediante inventarios verificables por lote.

1.4.6 Subsistema BOS (Balance of System)

El subsistema BOS integra todos los elementos auxiliares necesarios para la operación, control, protección y monitoreo del sistema fotovoltaico que no están incluidos en los subsistemas anteriores. Lo conforman los tableros eléctricos de distribución y protección, los sistemas de supervisión y control remoto (SCADA) y la infraestructura civil asociada —cimentaciones, canalizaciones, drenajes y accesos. Su relevancia dentro del protocolo de transporte reside en que, aunque sus componentes individuales son en su mayoría robustos, su correcta llegada al sitio es condición habilitante para la puesta en marcha del sistema completo.

Los tableros eléctricos operan bajo condiciones de alta energía durante su funcionamiento, lo que implica que cualquier daño en sus barras, interruptores o sistemas de distribución interna —generado por impactos durante el transporte— puede no ser detectable visualmente pero sí manifestarse como un riesgo de arco eléctrico o electrocución durante la instalación. Los sistemas SCADA, aunque presentan bajo riesgo físico intrínseco, son componentes electrónicos cuya manipulación inadecuada puede comprometer su calibración y capacidad de integración con los demás subsistemas. La infraestructura civil, si bien no constituye una carga sensible en sentido estricto, requiere que sus materiales de construcción lleguen en condiciones que garanticen la estabilidad estructural de las cimentaciones y la correcta conducción de drenajes, aspectos que condicionan la durabilidad del sistema en su conjunto.

Nota técnica: *La clasificación por subsistemas adoptada en este protocolo tiene un propósito operativo: permite asignar procedimientos de embalaje, condiciones de transporte y criterios de inspección diferenciados según las características técnicas de cada grupo de componentes. Esta granularidad es especialmente relevante en operaciones de gran escala como Colombia Solar, donde la estandarización de procedimientos por tipo de componente reduce la variabilidad en la gestión logística y, con ella, la probabilidad de daño acumulativo en la cadena de suministro.*

1.5 Implicaciones para el Transporte

1.5.1 El transporte como eslabón crítico de la cadena de implementación

El transporte de sistemas fotovoltaicos no es una actividad logística convencional. A diferencia del traslado de bienes industriales estándar, los componentes fotovoltaicos combinan alta fragilidad física, sensibilidad ambiental, diversidad de materiales y —en algunos casos— condición de mercancía peligrosa, lo que exige un enfoque técnico especializado en cada etapa del proceso. Su correcta gestión es condición necesaria para que el sistema pueda cumplir la función para la que fue diseñado: generar electricidad de forma confiable, eficiente y durante el horizonte de vida útil proyectado.

Una falla en la etapa de transporte no solo implica pérdidas materiales directas. Sus consecuencias se extienden a la fase operativa a través de degradaciones silenciosas que se manifiestan progresivamente, afectando indicadores clave como la generación energética efectiva, la vida útil del sistema, los costos de operación y mantenimiento, y —en el contexto de un programa como Colombia Solar— la percepción de las comunidades beneficiarias sobre la tecnología solar y la capacidad institucional para implementarla. Este último aspecto tiene implicaciones que trascienden lo técnico y se inscriben en la sostenibilidad social del programa.

1.5.2 Características técnicas que condicionan el transporte

La fragilidad estructural de los módulos fotovoltaicos, especialmente su susceptibilidad a microfracturas no visibles, exige condiciones de embalaje y estiba que distribuyan uniformemente las cargas y amortigüen las vibraciones. Los trayectos prolongados en vías con condiciones irregulares —frecuentes en los corredores rurales de las regiones donde se implementa Colombia Solar— pueden generar ciclos acumulativos de fatiga estructural que comprometen la integridad de las celdas sin dejar evidencia externa. Esta condición hace que la inspección visual en recepción sea insuficiente como único mecanismo de control, y refuerza la necesidad de estándares de embalaje rigurosos desde el origen.

La exposición a condiciones ambientales durante el transporte —humedad relativa elevada, temperaturas extremas, radiación ultravioleta— puede afectar materiales poliméricos, conexiones eléctricas y procesos de encapsulación. En el contexto de la región Caribe colombiana, donde las temperaturas en zonas de cargue y descargue pueden superar los 38°C con alta humedad relativa, esta exposición no es una condición excepcional sino parte del escenario operativo habitual. La diversidad de componentes en un mismo envío implica requerimientos diferenciados que no pueden ser gestionados con un enfoque homogéneo, exigiendo una planificación detallada de embalaje, distribución de carga, secuencia de cargue y descargue, y mecanismos de verificación en cada punto de la cadena.

1.5.3 Condicionantes territoriales en el contexto colombiano

El análisis del transporte de sistemas fotovoltaicos en Colombia debe considerar las condiciones específicas del territorio nacional, que introducen complejidades adicionales a las inherentes a la tecnología. La infraestructura vial colombiana presenta una marcada heterogeneidad: mientras los corredores principales entre ciudades capitales cuentan con condiciones aceptables, las vías secundarias y terciarias que comunican los cascos urbanos con las zonas rurales —donde se concentran los proyectos del programa Colombia Solar— presentan deficiencias estructurales que se agravan en temporadas de lluvia, generando condiciones de alto riesgo para cargas sensibles.

Las condiciones climáticas de la región Caribe añaden otra dimensión de complejidad. Las altas temperaturas, la elevada humedad relativa y la intensidad de la radiación solar durante el periodo seco, así como las precipitaciones intensas y los vientos asociados a la temporada lluviosa, generan un entorno logístico exigente que demanda adecuaciones específicas en los vehículos de transporte, los materiales de embalaje y los horarios operativos. La variabilidad climática interanual, exacerbada por los fenómenos El Niño y La Niña, hace que estas condiciones puedan intensificarse o modificar sus patrones estacionales con efectos directos sobre la planificación logística.

La distancia entre los puntos de origen —puertos de importación o bodegas de distribución— y los sitios de instalación implica, en numerosos proyectos, cadenas de transporte de múltiples etapas: transporte primario desde el puerto hasta bodegas regionales, transporte secundario hacia centros de acopio municipales, y transporte local o de última milla hacia el sitio de instalación. Cada transferencia constituye un punto de riesgo adicional para la integridad de los equipos, y la capacidad operativa disponible en cada eslabón de la cadena no siempre garantiza los estándares técnicos requeridos.

1.5.4 Tipología general de riesgos asociados al transporte

Sin perjuicio del análisis detallado que se desarrollará en el Capítulo 3, es posible identificar cuatro categorías generales de riesgo inherentes al transporte de sistemas fotovoltaicos, cuya comprensión es fundamental para dimensionar el alcance del presente protocolo.

Categoría	Origen	Manifestación	Impacto potencial
Físico	Vibraciones, impactos mecánicos	Microfracturas, deformación estructural	Pérdida de eficiencia generativa
Ambiental	Humedad, temperatura, UV	Degradación de polímeros, corrosión	Reducción de vida útil
Logístico	Manipulación deficiente, estiba inadecuada	Daños en cargue/descargue, pérdida de trazabilidad	Retrasos, sobrecostos
Regulatorio	Incumplimiento normativo	Etiquetado, documentación, embalaje	Responsabilidad legal, sanciones

Un aspecto crítico que trasciende estas categorías individuales es la naturaleza acumulativa e interdependiente de los riesgos. En los sistemas fotovoltaicos, los efectos de una falla durante el transporte raramente se manifiestan de forma inmediata y evidente: los daños son frecuentemente progresivos, se acumulan a nivel de sistema y pueden manifestarse meses después de la instalación, cuando el diagnóstico resulta más costoso y la atribución causal más compleja.

1.6 Marco Normativo General Aplicable al Transporte

El transporte de componentes de sistemas fotovoltaicos en Colombia no ocurre en un vacío regulatorio. Existe un conjunto de disposiciones normativas —de orden nacional e internacional— que establecen condiciones y obligaciones aplicables a distintos aspectos del proceso logístico, abarcando materias tan diversas como el manejo de mercancías con características especiales, la seguridad eléctrica, la gestión responsable de residuos y los estándares técnicos propios de los equipos que conforman un sistema de generación solar.

La adecuada comprensión de este entorno normativo es condición necesaria para que el protocolo de transporte cumpla su propósito: no basta con que las decisiones operativas sean técnicamente correctas si no están respaldadas por el cumplimiento de las obligaciones que el ordenamiento jurídico impone a quienes participan en la cadena logística. En ese sentido, el marco normativo no debe entenderse como un trámite formal, sino como un componente estructural de la gestión del riesgo.

Colombia cuenta con regulación específica para el transporte terrestre de carga, el manejo de mercancías peligrosas y la disposición de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, y a esta regulación nacional se suman los estándares técnicos internacionales que definen las condiciones bajo las cuales los distintos componentes fotovoltaicos deben ser manipulados, almacenados y trasladados para preservar su integridad y garantizar la seguridad de las personas involucradas. El análisis detallado de cada disposición aplicable, su alcance y sus implicaciones prácticas se desarrolla en el Capítulo 4 del presente protocolo.

1.7 Síntesis del Capítulo

El análisis desarrollado en el presente capítulo permite establecer tres conclusiones de carácter estructural que fundamentan el resto del protocolo. En primer lugar, los sistemas fotovoltaicos son sistemas complejos cuya integridad no puede ser evaluada componente por componente en forma aislada: su desempeño operativo depende de la interacción correcta de todos sus subsistemas —generación, conversión, almacenamiento, conducción, estructura y BOS—, lo que implica que el daño en cualquiera de ellos tiene consecuencias sobre el conjunto. Esta condición sistémica debe ser el principio rector de todas las decisiones logísticas.

En segundo lugar, el transporte no es una etapa neutra en el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico: es un punto de riesgo con capacidad de comprometer el desempeño de largo plazo del sistema a través de daños que pueden pasar desapercibidos en la inspección de recepción. La naturaleza acumulativa y frecuentemente invisible de estos daños exige estándares de manejo que vayan más allá de la lógica del transporte de carga convencional.

En tercer lugar, las condiciones del territorio colombiano —infraestructura vial heterogénea, clima exigente, cadenas de transporte de múltiples eslabones y capacidad operativa local variable— configuran un contexto logístico que demanda protocolos específicamente adaptados a la realidad del país, y no la simple adopción de estándares diseñados para entornos de mayor desarrollo infraestructural. Esta adaptación territorial es, en última instancia, lo que diferencia un protocolo funcional de un documento meramente formal.

Sobre estas tres bases conceptuales se construyen los capítulos subsiguientes del presente protocolo, que abordarán en detalle los procedimientos de embalaje, las condiciones de transporte, el análisis de riesgos y los mecanismos de control y verificación aplicables al programa Colombia Solar.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE RUTAS Y TIPOLOGÍAS DE TRANSPORTE DE MATERIALES

El transporte de los componentes de los sistemas fotovoltaicos en Colombia constituye una cadena logística multietapa que inicia en entornos altamente controlados —como puertos marítimos y corredores logísticos nacionales— y culmina en territorios rurales dispersos, caracterizados por limitaciones en infraestructura, capacidades técnicas y control operativo. Esta transición progresiva implica un incremento sustancial en la incertidumbre operativa y en la exposición a riesgos, tanto para las personas como para el medio ambiente y la integridad de los equipos. Comprender las tipologías de vía que componen esta cadena es condición previa para diseñar procedimientos de transporte que respondan a las condiciones reales del territorio.

Tipologías de vías					
Tipologías de rutas	**Vías**	**Características de las vías**	Análisis de riesgo		**Propuesta**
Terrestre	1. Vías de primer orden	Descripción de las vías, vehículos, logística	De los aparatos eléctricos y electrónicos De los RAEES y RESPEL	Sobre las Personas, Ambiente, integridad de los aparatos	Alfredo
	2. Vías de segundo orden	Descripción de las vías, vehículos, logística	De los aparatos eléctricos y electrónicos De los RAEES y RESPEL	Sobre las Personas, Ambiente, integridad de los aparatos	
	3. Vías de tercer orden	Descripción de las vías, vehículos, logística	De los aparatos eléctricos y electrónicos De los RAEES y RESPEL	Sobre las Personas, Ambiente, integridad de los aparatos	Jennifer
	4. Caminos rurales - Herradura — Animal / Personas	Descripción de los caminos, medios de transporte, logística	De los aparatos eléctricos y electrónicos De los RAEES y RESPEL	Sobre las Personas, Ambiente, integridad de los aparatos	Oscar
Fluvial y marítimo	5. Fuvial / 6. Marítimo	Descripción de los caminos, medios de transporte, logística	"De los aparatos eléctricos y electrónicos De los RAEES y RESPEL	Sobre las Personas, Ambiente, integridad de los aparatos	David

Figura 3. Tipologías de rutas de transporte en el programa Colombia Solar

2.1 Vías de Primer y Segundo Orden

De acuerdo con la Guía para la categorización de la red vial nacional expedida por el Ministerio de Transporte, las vías de primer orden son aquellas que cumplen la función de integrar las principales zonas de producción y consumo del país, y de este con los demás países, comunican con puertos y aeropuertos de nivel nacional e internacional, presentan un volumen de tránsito igual o superior a 700 vehículos diarios, y están construidas en doble calzada o calzada sencilla mayor o igual a 7,30 metros de ancho.



Figura 4. Vía de primer orden. Fuente: INVÍAS

Las vías de segundo orden, según la misma guía, son aquellas cuya función permite la comunicación entre dos o más municipios o con una vía de primer orden, con un volumen de tránsito igual o superior a 150 vehículos por día y menor de 700 vehículos por día, construidas en calzada sencilla con ancho inferior a 7,30 metros, con población servida en cabecera municipal superior a 15.000 habitantes.



Figura 5. Vía de segundo orden. Fuente: INVÍAS

Para el tramo logístico de vías de primer orden, que corresponde al desplazamiento de los equipos desde los puertos marítimos hacia los centros de acopio principales, el transporte se realiza en condiciones de infraestructura relativamente favorables: superficies pavimentadas, continuidad operativa y capacidad para movilizar carga pesada. Sin embargo, estas ventajas se ven contrarrestadas por condiciones de alta exigencia dinámica, tales como velocidades elevadas, interacción constante con transporte pesado y eventos de tránsito de alta energía que representan riesgos específicos para los componentes más sensibles.

En las vías de segundo orden, que conectan los centros de acopio principal con bodegas regionales o municipales, se introduce un cambio significativo en la dinámica logística. La fragmentación de la carga y la necesidad de redistribución de los equipos implican que las condiciones de transporte cambian hacia un entorno caracterizado por irregularidades en la superficie, curvas cerradas y pendientes pronunciadas, con menor estandarización en los procesos de cargue y descargue.

2.1.1 Tipo de vehículo

En las vías de primer orden se emplean vehículos de carga pesada, principalmente tractocamiones con semirremolques y sistemas de contenedores, lo que permite transportar grandes volúmenes de equipos en condiciones estandarizadas. La carga suele organizarse mediante contenedores certificados, pallets y sistemas de sujeción mecánica que buscan minimizar el movimiento interno de los materiales.



Figura 6. Tractocamión con semirremolque para transporte de primer orden

Para las vías de segundo orden se utilizan vehículos de carga media, como camiones rígidos tipo NPR, NQR o doble troque, adecuados para el transporte de volúmenes intermedios y con mayor capacidad de maniobra en vías con geometría compleja.



Figura 7. Camión de carga media para transporte de segundo orden

2.1.2 Riesgos asociados al transporte

En las vías de primer y segundo orden, los riesgos asociados al transporte de sistemas fotovoltaicos se analizan en tres dimensiones fundamentales: riesgos para los equipos, riesgos para las personas y riesgos para el ambiente.

Riesgos para los equipos

Los paneles fotovoltaicos son susceptibles a microfisuras invisibles causadas por vibraciones de alta frecuencia en juntas de dilatación y pavimentos rígidos, así como al efecto de succión aerodinámica (efecto vela) en zonas de altos vientos cuando la carga no está herméticamente asegurada. Un choque de alta energía en una vía troncal puede comprimir módulos y en casos extremos comprometer la integridad estructural de baterías, con riesgo de incendio químico e emisión de gases tóxicos.

Los inversores y reguladores de carga son susceptibles a fallos internos por vibración: el desprendimiento de componentes, la fatiga de soldaduras y los daños en ventiladores de refrigeración pueden ser ocasionados por vibraciones de alta frecuencia o choques mecánicos producidos por baches. El subsistema de conducción y protección eléctrica puede ver afectada la precisión de sus protecciones ante impactos repetidos, generando desajustes internos que deriven en disparos en falso o inacción ante cortocircuitos. Las estructuras de soporte, al superar en ocasiones las dimensiones estándar de carga, pueden generar riesgos de colisión en túneles o bajo puentes con gálibos limitados.

Riesgos para las personas

En las vías de primer y segundo orden se presentan riesgos por alta velocidad, fatiga del conductor en trayectos largos y colisiones con otros vehículos de carga. Los tramos con curvas cerradas, pendientes pronunciadas y riesgo de derrumbes pueden provocar volcamientos, especialmente con estructuras sobredimensionadas. En las operaciones de cargue y descargue, la manipulación mediante montacargas exige personal cualificado, y la manipulación manual introduce riesgos de sobreesfuerzo, golpes y atrapamientos por manejo de cargas pesadas en zonas de alta circulación vehicular.

Riesgos para el ambiente

Los derrames accidentales de combustibles y los posibles componentes químicos de baterías o transformadores conllevan el riesgo de vertidos que contaminan suelos y fuentes hídricas. La lixiviación y el contacto de cualquier componente contaminante con recursos naturales en caso de accidente puede

ocasionar deterioro ambiental de difícil reversibilidad, especialmente en corredores viales próximos a cuerpos de agua o ecosistemas sensibles.

2.1.3 Gestión de residuos RAEE y RESPEL

Los sistemas fotovoltaicos se transportan hacia los lugares de instalación como Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE). Una vez cumplido su ciclo de vida, se clasifican como Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y, en el caso de algunos componentes, como Residuos Peligrosos (RESPEL). Los riesgos asociados al transporte de retorno de estos residuos por vías de primer y segundo orden incluyen la accidentalidad por alta velocidad —con posibilidad de derrame de sustancias tóxicas como plomo, mercurio y cadmio ante ruptura del contenedor—, la inestabilidad de la carga por deficiencias en la pavimentación, y el riesgo de derrame accidental de lixiviados de baterías ante volcamiento. Su transporte debe cumplir con las disposiciones del Decreto 1609 de 2002 y la Ley 1672 de 2013.

2.2 Vías de Tercer Orden

Las vías de tercer orden o vías terciarias en Colombia son corredores fundamentales que conectan las cabeceras municipales con las veredas y núcleos productivos rurales. Son administradas en gran medida por los municipios con el apoyo del INVÍAS y se caracterizan por ser caminos de calzada sencilla con superficies de rodadura en afirmado, tierra o, excepcionalmente, placas huella. Su función es permitir la conectividad local, aunque su diseño geométrico suele ser precario y altamente dependiente de la topografía accidentada de la región.

2.2.1 Caracterización de la vía

Las vías terciarias en Colombia presentan condiciones operativas desafiantes para el transporte de sistemas fotovoltaicos: secciones transversales reducidas y radios de curvatura cerrados que limitan el acceso de vehículos pesados; superficie de rodadura inestable con baches, lodos y zonas erosionables que genera vibraciones constantes, las cuales superan las pruebas estándar de transporte al inducir esfuerzos no controlados; necesidad recurrente de transbordar la carga a sistemas de transporte animal o manual debido a la falta de conectividad vial hasta el sitio final; y alta sensibilidad ambiental al localizarse frecuentemente cerca de cuerpos de agua o ecosistemas frágiles, lo que eleva el impacto de cualquier incidente de derrame o pérdida de carga.

Según el INVÍAS, Colombia cuenta con aproximadamente 142.000 kilómetros de red vial terciaria, de los cuales menos del 10% se encuentra pavimentado. Esta condición, agravada por la ausencia de mediación

tecnológica como suspensiones o sistemas de sujeción estandarizados, califica el nivel de riesgo del transporte en estas vías como Muy Alto, obligando a que la planificación logística integre desde la etapa de diseño el uso de embalajes de contingencia, la fragmentación de equipos en unidades de menor peso y volumen, y una gestión de residuos RAEE y RESPEL planificada para operar en condiciones de aislamiento.

2.2.2 Análisis de riesgo del transporte

El transporte de sistemas fotovoltaicos hacia zonas rurales a través de vías de tercer orden constituye un desafío logístico de alta complejidad técnica donde la integridad de componentes críticos —paneles, inversores y baterías— se ve comprometida por una convergencia de factores adversos. Durante el trayecto, la irregularidad del terreno somete a los módulos fotovoltaicos a esfuerzos dinámicos de torsión y flexión que exceden las capacidades de diseño estándar, induciendo microfisuras invisibles en las celdas de silicio que pueden derivar en fallos prematuros de eficiencia. Simultáneamente, la exposición prolongada a variables climáticas como la lluvia intensa, la humedad persistente y las fluctuaciones térmicas extremas degrada los embalajes y compromete la integridad electrónica de inversores y reguladores al favorecer la entrada de partículas o la oxidación prematura.

Esta vulnerabilidad se magnifica ante la necesidad de fragmentar la carga para su movilización manual o mediante animales, maniobra que introduce esfuerzos de torsión no controlados y cambios continuos en el centro de gravedad. La operatividad en pendientes pronunciadas y senderos estrechos eleva la probabilidad de caídas, atrapamientos y colisiones estructurales, y traslada la responsabilidad del control del riesgo hacia el personal, cuya capacidad de respuesta en entornos de aislamiento se ve limitada por la fatiga física y la complejidad del terreno.

Desde la perspectiva ambiental, la localización frecuente de estas vías en cercanía de cuerpos de agua y ecosistemas sensibles hace que cualquier derrame de aceite dieléctrico o lixiviado de batería tenga consecuencias ambientales de difícil contención y atribución. La ausencia de infraestructura de respuesta ante emergencias en estos corredores convierte la prevención en el único mecanismo real de gestión del riesgo ambiental.

2.2.3 Gestión de residuos RAEE y RESPEL

La gestión de residuos RAEE y RESPEL en vías terciarias se enfrenta a una paradoja operativa crítica: la logística inversa se convierte en el punto de mayor vulnerabilidad del proyecto, ya que las mismas restricciones geográficas que limitan el ingreso de equipos nuevos hacen prácticamente inviable la evacuación de residuos deteriorados debido a su inestabilidad estructural. Este escenario implica un riesgo sanitario y ambiental exponencial, dado que el manejo de materiales fracturados o con fugas por parte de

operarios sin formación técnica ni EPP adecuados contraviene la Política Nacional para la Gestión Integral de RAEE (MADS, 2017) y expone al ecosistema a la contaminación persistente por metales pesados en suelos y cuerpos de agua.

Es indispensable integrar la gestión de residuos desde la etapa inicial de diseño, definiendo procedimientos de embalaje de emergencia —contenedores rígidos y sistemas de protección contra cortes— y estableciendo acuerdos formales con gestores autorizados que posean capacidad operativa real para trabajar en condiciones de aislamiento y difícil acceso.

2.2.4 Nivel de riesgo y síntesis técnica

El nivel de riesgo asociado al transporte de equipos fotovoltaicos en vías de tercer orden se clasifica técnicamente como Muy Alto, debido a la convergencia crítica de factores como la imprevisibilidad del terreno, la alta probabilidad de incidentes durante la manipulación y la severidad de las consecuencias ante fallos estructurales en los equipos o lesiones en el personal. El transporte en la red vial terciaria no debe ser considerado como una actividad logística secundaria, sino como un condicionante estructural crítico que define la viabilidad del proyecto desde su fase de diseño: la ausencia de mediación tecnológica en senderos rurales impide garantizar la integridad de los equipos bajo configuraciones estándar, obligando a una reingeniería previa que priorice la fragmentación de cargas, la selección de tecnologías resilientes y el uso de estructuras modulares.

2.3 Caminos Rurales de Herradura y Peatonales

Los caminos de herradura y los caminos peatonales representan los últimos eslabones de la cadena logística en el programa Colombia Solar y, en términos de complejidad operativa, los más exigentes de todo el sistema de transporte. No son variantes menores de una vía convencional: son entornos radicalmente distintos en los que las reglas del transporte motorizado dejan de aplicar y donde la logística depende enteramente de la capacidad física de animales de carga o de personas.

2.3.1 Caminos de herradura — Caracterización

Los caminos de herradura son senderos no vehiculares, generalmente de entre 0,8 metros y 1,5 metros de ancho —aunque en tramos críticos pueden reducirse a menos de 0,6 metros—, trazados históricamente para el tránsito de personas y animales de carga en terrenos de alta complejidad topográfica. Su superficie es irregular, sin tratamiento y altamente variable: piedra suelta, tierra compactada, raíces expuestas, cruces de quebradas sin infraestructura de paso y tramos con pendientes que en zonas de montaña superan el 30%.

Desde el punto de vista de la capacidad de carga, los animales utilizados —mulas o caballos— pueden transportar entre 80 kg y 120 kg por animal bajo condiciones adecuadas, aunque desde una perspectiva técnica y de bienestar animal se recomienda no superar el 20%-25% del peso vivo del animal. Esta condición física obliga a fragmentar los sistemas fotovoltaicos en unidades más pequeñas, incrementando el número de ciclos de transporte y la exposición acumulada al riesgo. La altura de transporte —aproximadamente entre 1,2 m y 1,6 m sobre el nivel del suelo— incrementa la energía potencial en caso de caída y, por tanto, la severidad de los impactos sobre los equipos.

2.3.2 Caminos de herradura — Análisis de riesgo

El análisis de riesgo en caminos de herradura muestra que la geometría del sendero y las características del animal condicionan directamente los mecanismos de afectación. El ancho limitado del camino restringe el volumen de los paquetes y aumenta la probabilidad de impactos laterales, especialmente cuando la carga sobresale del eje del animal. Los módulos fotovoltaicos presentan una alta vulnerabilidad a esfuerzos de flexión derivados de amarres desbalanceados, así como a impactos laterales en senderos estrechos. Los inversores pueden sufrir daños por vibración localizada y contaminación con polvo o humedad. Las baterías, por su peso, representan un punto crítico: incrementan el riesgo de desbalance del animal y de caída, con posibles consecuencias químicas y térmicas que en un entorno remoto sin capacidad de respuesta pueden ser irreversibles.

Desde la perspectiva de las personas, el operario debe interactuar constantemente con el animal y la carga en espacios reducidos, lo que incrementa la probabilidad de caídas, atrapamientos y golpes. La imprevisibilidad del animal ante ruidos, obstáculos o condiciones de calor extremo introduce un factor de riesgo que no existe en el transporte motorizado. Desde la perspectiva ambiental, la liberación de sustancias peligrosas desde alturas superiores a un metro puede generar dispersión de contaminantes en áreas más amplias, especialmente en pendientes o cercanías a cuerpos de agua en ecosistemas de alta sensibilidad.

2.3.3 Caminos peatonales — Caracterización

Los caminos peatonales representan el nivel más restrictivo de la cadena logística. Corresponden a corredores donde no es posible el uso de vehículos ni de animales de carga, y el desplazamiento de equipos depende exclusivamente de la capacidad física del operario. Presentan anchos típicos entre 0,4 m y 0,8 m, con superficies que combinan roca expuesta, barro, raíces y escalinatas, y puentes improvisados sobre troncos o cables. Los equipos se transportan a alturas variables respecto al cuerpo del operario, lo que los somete a microimpactos continuos, vibraciones de baja amplitud y cambios constantes en el centro de gravedad que afectan tanto la estabilidad de la carga como la integridad de los componentes.

2.3.4 Caminos peatonales — Análisis de riesgo

El transporte manual en senderos concentra el riesgo en la interacción directa entre el operario, la carga y el entorno físico. La manipulación constante, sumada a la fatiga progresiva y a la irregularidad del terreno, incrementa la probabilidad de pérdida de control, caídas y golpes. Los módulos fotovoltaicos presentan una vulnerabilidad extrema frente a impactos y esfuerzos de flexión, siendo altamente susceptibles a la fractura del vidrio templado o a la fisuración del silicio incluso ante caídas de baja altura. Las baterías constituyen un componente crítico: una caída puede generar deformación de celdas, ruptura del contenedor y liberación de electrolitos, con posibles consecuencias de seguridad y ambientales graves en entornos sin capacidad de respuesta.

Este escenario configura el de mayor riesgo laboral de toda la cadena. Los riesgos ergonómicos asociados al levantamiento y transporte de cargas —lesiones musculoesqueléticas, fatiga y disminución de la capacidad de reacción— se suman a factores ambientales como superficies resbaladizas por lluvia, riesgo de insolación o hipotermia según la región, y la posible interacción con fauna silvestre que puede generar situaciones de riesgo directo. Adicionalmente, en ambientes de baja temperatura o alta altitud, el operario puede estar expuesto a hipotermia y disminución del rendimiento físico que afectan directamente la seguridad del transporte.

Desde la perspectiva ambiental, los impactos en senderos peatonales se caracterizan por su ocurrencia directa en ecosistemas sensibles y por la dificultad de implementar medidas de contención. La liberación de electrolitos de baterías puede generar contaminación localizada con efectos persistentes en suelos y cuerpos de agua.

2.3.5 Gestión de residuos RAEE y RESPEL

La evacuación de RAEE y RESPEL a través de caminos de herradura y peatonales constituye el punto más crítico de la logística inversa asociada a sistemas fotovoltaicos en zonas de difícil acceso. Los mismos corredores que ya presentan limitaciones significativas para el ingreso de equipos nuevos se convierten en trayectos aún más exigentes cuando se trata de retirar materiales deteriorados. Un módulo fracturado expone bordes de vidrio cortante y trazas de metales pesados; una batería dañada puede tener fugas activas de electrolito; un inversor con carcasa comprometida puede exponer componentes energizados si no fue correctamente desenergizado antes del retiro.

Esta realidad impone al protocolo una exigencia que va más allá de la logística inversa convencional: la gestión de residuos en estos corredores debe ser planificada desde el momento del diseño del sistema, definiendo previamente los procedimientos de embalaje de emergencia para residuos en campo, los equipos

de protección personal que deben acompañar cada operación, y los acuerdos con gestores autorizados de RAEE y RESPEL que tengan capacidad real de operar en zonas de difícil acceso.

2.3.6 Nivel de riesgo y articulación sistémica

Los caminos de herradura y los caminos peatonales comparten la calificación de Muy Alto —la máxima del protocolo— pero por razones con matices diferenciados. En los caminos de herradura, el riesgo se distribuye entre la imprevisibilidad del animal, las condiciones del terreno y la manipulación manual en los puntos de cargue y descargue. En los caminos peatonales, el riesgo se concentra enteramente en la capacidad física y la formación del operario, eliminando cualquier variable de control mecánico o animal y haciendo de la persona el único sistema de gestión de la carga disponible.

Lo que unifica ambos escenarios es la ausencia total de mediación tecnológica entre la carga y el entorno, y la consecuente imposibilidad de implementar mecanismos de respuesta rápida ante incidentes. Esta condición tiene una implicación estratégica que trasciende el análisis de riesgo: la decisión de transportar sistemas fotovoltaicos por estos corredores no debe tomarse únicamente con base en la viabilidad logística inmediata, sino considerando el balance entre el riesgo acumulado sobre los equipos, la seguridad del personal, el impacto ambiental potencial y la sostenibilidad del programa. En algunos casos, ese balance justifica el rediseño del sistema fotovoltaico para adaptarlo a las restricciones del corredor —módulos de menor formato y peso, sistemas de almacenamiento de menor riesgo térmico, estructuras desmontables en piezas de menor dimensión— antes que forzar el transporte de equipos estándar por corredores que no están en condiciones de recibirlos sin daño significativo.

2.4 Vías Fluviales

Los ríos, caños y esteros que atraviesan el territorio colombiano no son simplemente una alternativa al transporte terrestre: en amplias zonas del Pacífico, la Amazonía y la Orinoquía constituyen la única vía de acceso existente, y como tal, un eslabón insustituible en la cadena logística del programa Colombia Solar. Esta condición implica que las limitaciones y riesgos de este modo de transporte no pueden ser evitados mediante rutas alternativas, sino que deben ser gestionados con procedimientos específicamente diseñados para el entorno fluvial.

2.4.1 Caracterización de la vía

Los cuerpos de agua que conforman esta categoría son heterogéneos en naturaleza y condiciones operativas. Los ríos de gran caudal como el Magdalena, el Atrato o el Meta permiten la navegación de embarcaciones de mayor porte y presentan condiciones de corriente relativamente predecibles en épocas estables. Los caños y esteros de la Orinoquía y la Amazonía, en cambio, son corredores de navegación estrecha, baja profundidad y alta dependencia del nivel de lluvias reciente, donde una semana de sequía puede reducir el calado disponible por debajo del mínimo navegable para embarcaciones con carga. Esta heterogeneidad implica que el análisis de riesgo no puede aplicarse uniformemente a toda la categoría y que el protocolo debe reconocer esa diferencia al momento de definir procedimientos específicos.

Las embarcaciones utilizadas en estos corredores son predominantemente canoas con motor fuera de borda, lanchas de aluminio o fibra de vidrio y, en algunos casos, botes de madera de construcción artesanal. Todas comparten características que las distinguen radicalmente del transporte terrestre: capacidad de carga reducida —frecuentemente entre 500 kilogramos y 2 toneladas—, ausencia de cubierta protectora para la mercancía, inestabilidad ante oleaje generado por corrientes o por el paso de otras embarcaciones, y total dependencia de las condiciones del río en el momento del viaje. No existe en estas embarcaciones un sistema estandarizado de amarre o estiba para carga industrial: los equipos se distribuyen según el criterio del operador, condición que introduce una variabilidad de manejo que el protocolo debe regular con criterios mínimos obligatorios.

Los ríos colombianos pueden experimentar variaciones de nivel superiores a los diez metros entre temporada seca y lluviosa, transformando completamente las condiciones de navegación y los puntos de acceso a las orillas. En temporada de creciente, los remolinos, los troncos arrastrados y los obstáculos sumergidos representan riesgos de colisión que en aguas tranquilas no existen. En temporada seca, el nivel bajo puede encallar embarcaciones cargadas en bancos de arena, obligando a descargas manuales parciales en condiciones de alta exposición ambiental. La baja o nula cobertura de comunicaciones en la mayoría de estos corredores significa que cualquier emergencia ocurrida en ruta debe resolverse con los recursos disponibles a bordo, sin posibilidad de solicitar apoyo externo en tiempo real.

2.4.2 Análisis de riesgo del transporte — Entrada de equipos

El transporte de sistemas fotovoltaicos por vías fluviales introduce una transformación fundamental en la naturaleza del riesgo respecto a los segmentos terrestres de la cadena: el entorno acuático elimina la posibilidad de detener la operación ante una contingencia y la reemplaza por un escenario donde cualquier evento adverso —volcamiento, encallamiento, colisión— tiene consecuencias inmediatas e irremediables. Esta condición de irreversibilidad es el rasgo definitorio del riesgo fluvial y el argumento central que justifica estándares de prevención más exigentes que en cualquier modo de transporte terrestre.

Desde la perspectiva de los equipos, el riesgo dominante en el entorno fluvial no es la vibración mecánica sino la exposición combinada y permanente a humedad, agua y movimiento tridimensional de la embarcación. Los módulos fotovoltaicos no están concebidos para soportar salpicaduras directas o exposición prolongada al vapor de agua en condiciones de carga sobre una embarcación en movimiento. Las juntas de sellado del marco y la caja de conexiones son los puntos críticos de ingreso de humedad: una infiltración sostenida durante el trayecto inicia procesos de delaminación del encapsulante EVA que reducen la transmitancia óptica hacia las celdas y comprometen el rendimiento del módulo de forma progresiva e irreversible. El movimiento tridimensional de la embarcación —cabeceo, balanceo y guiñada simultáneos— genera perfiles de desplazamiento de carga que los sistemas de amarre diseñados para transporte terrestre no mitigan adecuadamente.

Los inversores y reguladores concentran un riesgo específico derivado de la condensación: los cambios bruscos de temperatura entre el interior de la embarcación calentado por irradiación solar y el ambiente húmedo del río generan condensación sobre las superficies internas de los equipos electrónicos, especialmente cuando los embalajes no incorporan materiales desiccantes. Las baterías de ion-litio representan el riesgo de mayor gravedad potencial: la posibilidad de volcamiento puede generar contacto con el agua, provocando cortocircuitos externos que disparan el fenómeno de fuga térmica con emisión de gases tóxicos. Cualquier fuga de electrolito cae directamente al cuerpo de agua, generando contaminación acuática de atribución inmediata sobre el programa.

Desde la perspectiva de las personas, la posibilidad de caída al agua durante el cargue, descargue o trayecto introduce el riesgo de ahogamiento en ríos con corriente fuerte y orillas inaccesibles. El uso de chalecos salvavidas es un requisito obligatorio bajo la NTC 4725 y las disposiciones de la Dirección General Marítima (DIMAR), pero su cumplimiento en operaciones logísticas rurales es frecuentemente deficiente. Desde la perspectiva ambiental, cualquier fuga, derrame o pérdida de carga ocurre directamente sobre o dentro del cuerpo de agua, sin posibilidad de contención, afectando fuentes de agua potable de comunidades ribereñas y ecosistemas acuáticos de alta biodiversidad bajo las disposiciones de la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1076 de 2015.

2.4.3 Gestión de residuos RAEE y RESPEL

La gestión de residuos en corredores fluviales enfrenta una paradoja operativa que el protocolo debe abordar con claridad: los mismos factores que dificultan el ingreso de equipos nuevos hacen prácticamente inviable la salida de residuos bajo condiciones de manejo adecuado. Un módulo fracturado, una batería deteriorada o un inversor dañado deben ser evacuados desde comunidades a las que solo se accede por río, hacia gestores autorizados que están a horas o días de navegación y que en muchos casos no tienen capacidad operativa para operar en estos corredores.

Los residuos de módulos fotovoltaicos dañados —clasificados como RAEE bajo la Ley 1672 de 2013— presentan en el entorno fluvial riesgos específicos de manejo: los bordes de vidrio expuesto representan riesgo de corte, y las trazas de metales pesados pueden lixiviarse si el residuo entra en contacto con el agua durante el transporte de retorno. Las baterías deterioradas, clasificadas como RESPEL bajo el Decreto 4741 de 2005, requieren embalajes de contención hermética que en la práctica son difíciles de conseguir en zonas rurales fluviales. El protocolo debe definir procedimientos de almacenamiento temporal seguro en sitio, con especificaciones de contenedores herméticos y criterios de señalización, así como estrategias de coordinación con gestores autorizados con capacidad fluvial real.

2.4.4 Nivel de riesgo y articulación sistémica

Las vías fluviales configuran un escenario de riesgo Alto a Muy Alto cuya calificación no es uniforme a lo largo de toda la categoría. Un trayecto corto en un caño tranquilo de la Orinoquía en época seca tiene un perfil de riesgo significativamente distinto al de una navegación de varias horas en el río Atrato durante temporada de lluvias. Esta variabilidad interna impide la aplicación de un estándar único y exige que los procedimientos incluyan criterios de evaluación previa de las condiciones de navegabilidad en cada trayecto específico.

Lo que sí es uniforme en toda la categoría es la condición de irreversibilidad que caracteriza los eventos adversos en el entorno fluvial. Esta condición impone al protocolo exigencias que van más allá de los estándares de embalaje: criterios claros de navegabilidad mínima, condiciones bajo las cuales la operación debe suspenderse —nivel del río, velocidad de corriente, condiciones de lluvia y visibilidad—, y disposiciones sobre equipos de seguridad y comunicación mínimos a bordo. Las comunidades que dependen del transporte fluvial son frecuentemente las de mayor aislamiento y menor acceso a energía convencional, lo que hace que una falla logística en este corredor tenga consecuencias que trascienden lo técnico y afectan directamente la equidad y sostenibilidad del programa Colombia Solar.

2.5 Vías Marítimas Costeras

⚠ CONTENIDO PENDIENTE: Sección 2.5 — Vías Marítimas Costeras. Contenido en proceso de elaboración por el equipo. Debe abordar: caracterización de rutas costeras (Caribe y Pacífico), tipos de embarcaciones menores, condiciones de salinidad y oleaje, análisis de riesgo para equipos/personas/ambiente en entrada y salida de residuos RAEE-RESPEL, y nivel de riesgo con articulación sistémica. Marco normativo: OMI SOLAS, NTC 4725, Decreto 1070 de 2015, DIMAR.

CAPÍTULO 3. RIESGOS ASOCIADOS AL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

El transporte de los componentes de los sistemas fotovoltaicos en Colombia constituye una cadena logística multietapa que inicia en entornos altamente controlados —como puertos marítimos y corredores logísticos nacionales— y culmina en territorios rurales dispersos, caracterizados por limitaciones en infraestructura, capacidades técnicas y control operativo. Esta transición progresiva implica un incremento sustancial en la incertidumbre operativa y en la exposición a riesgos, tanto para las personas como para el medio ambiente.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas fotovoltaicos están compuestos por materiales con propiedades físico-químicas diversas, incluyendo vidrio templado, aluminio, silicio, cobre, polímeros, semiconductores, electrolitos y metales pesados como plomo, cadmio y litio. En condiciones de daño, degradación o fin de vida útil, estos materiales pueden convertirse en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) o residuos peligrosos (RESPEL), con potencial de generar impactos sobre la salud humana y los ecosistemas. En Colombia, la gestión de estos residuos se encuentra regulada por la Ley 1672 de 2013, el Decreto 4741 de 2005 y el Decreto 1076 de 2015, los cuales establecen obligaciones relacionadas con la prevención, el manejo integral, el transporte seguro y la disposición final de residuos peligrosos. A su vez, el transporte de este tipo de materiales debe cumplir con lo dispuesto en el Decreto 1609 de 2002.

3.1 Durante la Importación y Nacionalización

Primer traslado: transporte portuario a bodegas principales

El primer tramo logístico corresponde al desplazamiento de los equipos desde los puertos marítimos hacia los centros de acopio principal, generalmente a través de vías de primer orden y mediante transporte en contenedores. Este es el segmento más controlado del sistema logístico, caracterizado por el uso de estándares internacionales de embalaje, manipulación mecanizada y trazabilidad de la carga.

En este segmento se emplean vehículos de carga pesada, principalmente tractocamiones con semirremolques y sistemas de contenedores, que permiten transportar grandes volúmenes de equipos en condiciones estandarizadas. La carga suele organizarse mediante contenedores marítimos, pallets certificados y sistemas de sujeción mecánica que buscan minimizar el movimiento interno de los materiales. Los paneles solares son transportados en estructuras tipo rack con protección contra impactos, mientras que los inversores y baterías requieren embalajes especializados que controlen vibraciones, humedad y temperatura.

No obstante, este nivel de estandarización no elimina los riesgos. Desde la perspectiva de la seguridad ocupacional, las operaciones portuarias implican alta exposición a eventos como golpes, atrapamientos y caídas de carga durante el uso de grúas, montacargas y sistemas de izaje. El transporte prolongado en contenedores puede generar efectos acumulativos de vibración que afectan la integridad de componentes sensibles como inversores y módulos fotovoltaicos. La exposición a ambientes salinos en zonas costeras puede acelerar la degradación de materiales, incrementando la probabilidad de generación temprana de residuos, especialmente en conexiones eléctricas y estructuras metálicas. Desde el enfoque de gestión de residuos, cualquier daño estructural ocurrido en este tramo puede convertir los equipos en residuos desde el momento mismo de su ingreso al país, activando la obligación de manejo conforme a los lineamientos de RAEE.

3.2 Durante el Almacenamiento y Planificación Logística

Segundo traslado: distribución regional y desconsolidación de carga

El segundo tramo conecta los centros de acopio principal con bodegas regionales o municipales, introduciendo un cambio significativo en la dinámica logística debido a la fragmentación de la carga y a la necesidad de reembalaje o redistribución de los equipos. En este tramo se utilizan vehículos de carga media, como camiones rígidos tipo NPR, NQR o doble troque, adecuados para el transporte de volúmenes intermedios. A diferencia del primer traslado, la carga se fracciona, lo que implica procesos adicionales de manipulación, redistribución y, en muchos casos, reembalaje, incrementando la probabilidad de daños físicos en los componentes.

Desde el punto de vista de los riesgos para las personas, este tramo presenta mayor incidencia de lesiones asociadas a la manipulación manual, incluyendo sobreesfuerzos, posturas inadecuadas y errores operativos derivados de la intervención de personal no especializado. El tránsito por vías secundarias incrementa la probabilidad de accidentes vehiculares. En cuanto a los riesgos ambientales, las vibraciones en vías en mal estado pueden generar microfracturas en los módulos fotovoltaicos y daños en componentes electrónicos, incrementando la probabilidad de generación de residuos prematuros. Las condiciones operativas incluyen mayor intervención manual, almacenamiento temporal en bodegas con niveles variables de adecuación técnica y menor estandarización en los procesos logísticos.

3.3 Durante el Transporte Primario

Tercer traslado: acceso a zonas rurales dispersas

El tercer tramo corresponde al desplazamiento desde las bodegas temporales de almacenamiento ubicadas en municipios o cabeceras intermedias hacia los sitios de instalación, localizados en su mayoría en zonas rurales dispersas con condiciones de accesibilidad altamente restringidas. Este tramo constituye el segmento de mayor complejidad técnica, operativa y de riesgo dentro de toda la cadena logística, debido a la convergencia de factores como la precariedad de la infraestructura vial, la fragmentación de la carga, la limitada disponibilidad de equipos especializados y la heterogeneidad en las capacidades técnicas del personal involucrado.

Este tramo abarca una amplia tipología de vías, incluyendo carreteras terciarias, vías sin pavimentar, caminos de herradura y trayectos fluviales. En vías terciarias pavimentadas, el transporte se realiza mediante vehículos livianos como camionetas 4x4, en los cuales la carga debe organizarse en unidades menores debidamente amortiguadas. En vías sin pavimentar, las condiciones operativas se tornan significativamente más exigentes, con presencia de pendientes pronunciadas, superficies inestables, barro, polvo y escorrentía superficial, requiriendo embalajes reforzados y en algunos casos doble embalaje. En escenarios sin infraestructura vial formal, el transporte se realiza mediante animales de carga o transporte manual, con los riesgos críticos ya analizados en la sección 2.3. En regiones con accesibilidad fluvial, el embalaje debe garantizar impermeabilidad, flotabilidad controlada y resistencia a impactos, con atención especial a los riesgos de contaminación acuática ante cualquier incidente.

En términos de capacidades técnicas, este tramo se caracteriza por una disminución progresiva en la especialización del personal, pasando de operadores logísticos capacitados a conductores rurales, ayudantes informales o incluso miembros de la comunidad. Esta situación exige la implementación de estrategias de capacitación diferenciadas, supervisión técnica y adaptación de protocolos operativos a las condiciones locales.

3.4 Durante el Transporte Secundario

Cuarto traslado: recolección y transporte de materiales en desmonte

El cuarto tramo corresponde a la recolección, acopio y transporte de los componentes del sistema fotovoltaico que han alcanzado el final de su vida útil, han sufrido daños o requieren reemplazo. Este proceso incluye principalmente módulos fotovoltaicos averiados, baterías agotadas, inversores fuera de operación, cableado deteriorado y otros componentes eléctricos y electrónicos, los cuales deben ser gestionados como RAEE y, en muchos casos, como RESPEL.

A diferencia del transporte de equipos nuevos, este tramo presenta un nivel de riesgo significativamente mayor debido al estado de los materiales. Los equipos pueden encontrarse fisurados, con fugas, corrosión, degradación de componentes internos o exposición de materiales peligrosos. Las baterías pueden presentar liberación de electrolitos, los módulos fotovoltaicos pueden liberar partículas o compuestos encapsulados, y los inversores pueden contener componentes electrónicos dañados con presencia de metales pesados.

El transporte sigue una lógica inversa a la del ingreso, iniciando en zonas rurales dispersas y avanzando hacia centros de acopio o tratamiento. El embalaje adquiere una importancia aún mayor, ya que debe garantizar la contención de materiales potencialmente peligrosos, evitar fugas y permitir una manipulación segura. Las guías técnicas de gestión de RAEE establecen que estos residuos deben ser embalados de manera que se prevenga la liberación de sustancias peligrosas y se facilite su transporte seguro hacia gestores autorizados. Los riesgos asociados incluyen la exposición del personal a sustancias peligrosas, la contaminación del suelo y cuerpos de agua en caso de derrames, y la generación de accidentes por manipulación de materiales inestables.

3.5 Durante el Desmantelamiento y Disposición Final

Quinto traslado: transporte hacia disposición final

El quinto tramo corresponde al transporte de los residuos derivados de los sistemas fotovoltaicos desde los centros de acopio intermedios hacia instalaciones autorizadas para su tratamiento, aprovechamiento o disposición final. Este segmento representa una fase crítica dentro del ciclo de vida de los sistemas, en la medida en que define el cierre ambientalmente seguro de los materiales y condiciona la prevención de impactos acumulativos sobre el entorno.

A diferencia de los tramos previos, este traslado se desarrolla predominantemente sobre infraestructura vial de mayor nivel, lo que permite el uso de vehículos especializados en el transporte de residuos peligrosos: camiones cerrados tipo furgón, vehículos con contenedores herméticos o unidades con sistemas de retención de derrames. Los residuos deben clasificarse según su naturaleza —RAEE aprovechables, RAEE peligrosos, residuos no aprovechables—, evitando la mezcla de materiales incompatibles. Los vehículos deben cumplir con las especificaciones del Decreto 1609 de 2002, incluyendo señalización externa, sistemas de emergencia (extintores, kits de contención), documentación obligatoria (tarjeta de emergencia, manifiesto de carga) y condiciones técnicas adecuadas para el transporte de mercancías peligrosas.

Los conductores y operadores deben contar con formación certificada en transporte de mercancías peligrosas, manejo de emergencias y uso de equipos de protección personal, conforme al Decreto 1072 de 2015. Los riesgos en este tramo incluyen derrames de sustancias peligrosas, liberación de vapores tóxicos, incendios asociados a baterías, exposición del personal a contaminantes y contaminación del suelo o

cuerpos de agua en caso de accidente. Dado que algunos residuos contienen sustancias como plomo, cadmio, mercurio y retardantes de llama bromados, el transporte debe garantizar condiciones que eviten su dispersión y faciliten la entrega a gestores autorizados bajo las obligaciones de la Ley 1672 de 2013.

3.6 Durante los Almacenamientos Temporales

Los puntos de almacenamiento temporal a lo largo de la cadena logística —bodegas portuarias, centros de acopio regional, bodegas municipales y sitios de acopio en campo— constituyen nodos de riesgo específicos que el protocolo debe abordar. En estos puntos se concentran operaciones de cargue, descargue, inventario y redistribución que introducen riesgos de manipulación inadecuada, exposición ambiental no controlada y pérdida de trazabilidad. Las condiciones de almacenamiento —temperatura, humedad, ventilación, seguridad física— deben cumplir con requerimientos diferenciados según el tipo de componente: los módulos fotovoltaicos requieren superficies planas y protección contra impactos laterales; los inversores y equipos electrónicos demandan control de humedad; las baterías exigen condiciones de temperatura controlada y separación de fuentes de ignición; y los residuos RAEE y RESPEL deben almacenarse en contenedores identificados, separados de los equipos nuevos y bajo las condiciones establecidas por el Decreto 4741 de 2005.

CAPÍTULO 4. NORMATIVA ASOCIADA AL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

El marco normativo aplicable al transporte de sistemas fotovoltaicos articula disposiciones de carácter internacional y nacional que regulan aspectos como la seguridad en el transporte de mercancías peligrosas, la gestión de residuos, la seguridad eléctrica y los estándares técnicos de los equipos. A nivel internacional, el transporte de los componentes se rige por el tipo de vía —marítima, aérea y terrestre—, cada una con normas específicas de seguridad y operación. En el marco del programa Colombia Solar, este proceso es estratégico, ya que implica la movilización de equipos desde puertos hasta zonas urbanas y rurales mediante esquemas multimodales. Dentro de estos componentes, las baterías de ion-litio son las más reguladas, al ser clasificadas como mercancías peligrosas, lo que exige condiciones estrictas de embalaje, etiquetado, documentación y manejo.

4.1 Normativa Internacional Asociada al Transporte de Sistemas Fotovoltaicos

El transporte internacional de los componentes de los sistemas fotovoltaicos, en su fase de importación hacia Colombia, se realiza principalmente por vía marítima desde Asia, Europa y América del Norte, constituyéndose en el punto inicial de la cadena logística del presente protocolo. Este proceso se encuentra regulado por los siguientes organismos internacionales:

- Organización Marítima Internacional (OMI): A través del Código IMDG, regula el transporte marítimo de mercancías peligrosas, definiendo requisitos de clasificación, embalaje, etiquetado, estiba, segregación y documentación, especialmente para baterías de ion-litio (Clase 9).
- Organización de las Naciones Unidas (ONU): Establece la base normativa global mediante la reglamentación modelo para el transporte de mercancías peligrosas y el manual de pruebas y criterios (Sección 38.3), que define los requisitos para baterías UN 3480 y UN 3481.
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) / International Air Transport Association (IATA): Regulan el transporte aéreo de mercancías peligrosas, estableciendo restricciones específicas para baterías de litio, como límites de estado de carga (SoC ≤ 30%) y condiciones estrictas de embalaje.
- Comisión Económica para Europa (UNECE): Define los acuerdos ADR (carretera), RID (ferrocarril) y ADN (vías navegables), que armonizan el transporte terrestre y multimodal de mercancías peligrosas.
- International Electrotechnical Commission (IEC): Establece normas técnicas como IEC 62759-1, IEC 61215 e IEC 61730, relacionadas con la calidad, resistencia mecánica y comportamiento de los módulos fotovoltaicos durante transporte y operación.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): A través del Convenio de Basilea, regula el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, incluyendo baterías y residuos fotovoltaicos (RAEE).
- Department of Transportation (DOT/PHMSA — Estados Unidos): Mediante la regulación 49 CFR, establece requisitos específicos para el transporte de baterías de litio, alineados con estándares internacionales.
- Unión Europea: A través del Reglamento (UE) 2023/1542, incorpora criterios de sostenibilidad, trazabilidad y gestión del ciclo de vida de las baterías.
- Autoridades asiáticas (CAAC, DGCA, MLIT): Adoptan y complementan los estándares internacionales (ONU, OACI, IATA), incorporando requisitos adicionales de certificación en transporte aéreo.

4.2 Normativa Nacional Asociada al Transporte de Sistemas Fotovoltaicos

El marco normativo colombiano articula disposiciones de transporte, ambiente, gestión de residuos y regulación eléctrica aplicables a los componentes de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en el contexto del programa Colombia Solar, donde se requiere garantizar condiciones seguras de movilización, trazabilidad y manejo de materiales, incluyendo aquellos clasificados como peligrosos.

Ministerio de Transporte

- Decreto 1079 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte, que establece las condiciones generales para la prestación del servicio de transporte de carga en Colombia e incorpora las disposiciones del transporte de mercancías peligrosas.
- Decreto 1609 de 2002 (compilado en el Decreto 1079 de 2015): Regula el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas, definiendo requisitos de señalización, documentación, capacitación del personal y condiciones técnicas de los vehículos.
- Resolución 20223040045515 de 2022: Reglamenta el Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC), garantizando la trazabilidad de los movimientos de carga en el territorio nacional.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

- Decreto 4741 de 2005: Regula la gestión integral de residuos peligrosos (RESPEL), aplicable al manejo de baterías, aceites dieléctricos y otros componentes con potencial contaminante.
- Decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente, que compila la normativa relacionada con la gestión ambiental y el manejo de residuos.
- Ley 1252 de 2008: Establece disposiciones prohibitivas en materia ambiental relacionadas con la generación, manejo y disposición de residuos peligrosos.

Régimen de RAEE

- Ley 1672 de 2013: Define la política pública para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, bajo el principio de responsabilidad extendida del productor.
- Decreto 284 de 2018: Reglamenta la gestión integral de RAEE, estableciendo obligaciones para productores, comercializadores y gestores.
- Resolución 851 de 2022: Define los lineamientos para la implementación de sistemas de recolección y gestión de RAEE en el país.

Ministerio de Minas y Energía

- RETIE — Resolución 40117 de 2024: Establece los requisitos técnicos para instalaciones eléctricas, garantizando la seguridad e integridad de los equipos fotovoltaicos durante su transporte, instalación y operación.

4.3 Retos Normativos del Transporte de Sistemas Fotovoltaicos en Colombia

En continuidad con el marco normativo nacional expuesto, y en el contexto del programa Colombia Solar orientado a la masificación de soluciones energéticas en zonas rurales y Zonas No Interconectadas (ZNI), se identifican los siguientes retos normativos y operativos que limitan la adecuada implementación del transporte de los sistemas fotovoltaicos:

- Clasificación, regulación y capacitación en transporte de mercancías peligrosas: Aunque el Decreto 1609 de 2002 regula el transporte de mercancías peligrosas, su aplicación en territorios rurales presenta limitaciones, especialmente en baterías de ion-litio, con brechas significativas de capacitación y certificación en transportistas locales.
- Limitaciones en infraestructura vial y regulación de última milla: No existen lineamientos específicos para el transporte de equipos sensibles en vías terciarias, lo que genera microfisuras y pérdida de eficiencia en paneles sin respaldo normativo claro.
- Vacíos en la regulación del transporte de componentes eléctricos: El RETIE regula la instalación, pero no el transporte, generando riesgos para inversores, tableros y demás componentes durante su movilización.
- Gestión de residuos y logística inversa: A pesar de la Ley 1672 de 2013, el Decreto 284 de 2018, la Resolución 851 de 2022 y el Decreto 4741 de 2005, existen limitaciones operativas para el transporte de residuos fotovoltaicos y baterías degradadas desde zonas de difícil acceso.
- Articulación normativa frente a la transición energética: La Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 no desarrollan lineamientos específicos para el transporte de sistemas fotovoltaicos en contextos rurales complejos.
- Falta de estandarización técnica para subsistemas: No existe guía nacional que integre el transporte seguro de los subsistemas de generación, conversión, almacenamiento, conducción, estructura y BOS.

El marco normativo colombiano, aunque robusto, presenta vacíos en la regulación específica del transporte de tecnologías fotovoltaicas, especialmente en contextos rurales y Zonas No Interconectadas, lo que resalta la necesidad de fortalecer y complementar los instrumentos existentes para optimizar la implementación del programa Colombia Solar. Se requiere la formulación de decretos reglamentarios sectoriales y la estructuración de un instrumento de política que articule los sectores de transporte, ambiente y energía, estableciendo lineamientos técnicos, logísticos y de trazabilidad que garanticen la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en la ejecución de proyectos de transición energética en el país.

CAPÍTULO 5. MEDIDAS PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE RIESGOS ASOCIADOS AL TRANSPORTE

⚠ CONTENIDO PENDIENTE: Capítulo 5 completo — Contenido en proceso de elaboración. Debe desarrollar las siguientes secciones: 5.1 Medidas de prevención, 5.2 Embalajes, 5.3 Manipulación, 5.4 Gestión operativa del transporte, 5.5 Cierre de ciclo y gestión final de residuos, 5.6 Plan de atención de emergencias, 5.7 Trazabilidad y monitoreo, 5.8 Responsabilidad de los actores.

BIBLIOGRAFÍA

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). Guía para la gestión de residuos peligrosos (RESPEL).

Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA). (2026). Dangerous Goods Regulations (DGR) (67.ª ed.). IATA.

Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). (2021). IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval. IEC.

Congreso de la República de Colombia. (2008). Ley 1252 de 2008.

Congreso de la República de Colombia. (2013). Ley 1672 de 2013.

Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014.

Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993.

Congreso de la República de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021.

EPA (United States Environmental Protection Agency). (2020). Managing Used Oil: Advice for Small Businesses. Washington D.C.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2014). Animal traction in rural transport systems. Roma, Italia.

Fraunhofer ISE. (2020). Photovoltaics report.

IEA — International Energy Agency. (2020). End-of-life management of photovoltaic panels.

IEA PVPS. (2021). Transport, handling and installation of PV modules.

IEC (International Electrotechnical Commission). (2010). IEC 60364: Low-voltage electrical installations. Ginebra, Suiza.

IEC (International Electrotechnical Commission). (2016). IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval. Ginebra, Suiza.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). (2010). IEEE C57 Series: Power Transformers — General Requirements.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). (2015). IEEE Guide for the Design and Installation of Electric Power Systems for Industrial and Commercial Applications.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (s.f.). NTC 3972: Transporte de mercancías peligrosas. Clase 9.

Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (s.f.). Infraestructura vial y caracterización de corredores terciarios.

International Maritime Organization (IMO). (2024). International maritime dangerous goods (IMDG) code (Amendment 41-22/24).

IRENA. (2016). End-of-life management: Solar photovoltaic panels.

ISO (International Organization for Standardization). (2007). ISO 11228-1: Ergonomics — Manual handling — Lifting and carrying. Ginebra, Suiza.

ISO (International Organization for Standardization). (2013). ISO 1496-1: Series 1 freight containers — Specification and testing — Part 1: General cargo containers. Ginebra, Suiza.

ISTA (International Safe Transit Association). (2018). ISTA 3 Series: Performance Testing for Packaged-Products. Michigan, EE. UU.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2005). Decreto 4741 de 2005.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible — MADS. (2017). Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Bogotá, Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Guía técnica para la gestión integral de RAEE.

Ministerio de Ambiente. (s.f.). Guías ambientales para almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas.

Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2024 (RETIE).

Ministerio de Trabajo. (2015). Decreto 1072 de 2015.

Ministerio de Transporte. (2002). Decreto 1609 de 2002.

Ministerio de Transporte. (2015). Decreto 1079 de 2015.

Ministerio de Transporte. (2022). Resolución 45515 de 2022 (RNDC).

Naciones Unidas. (2023). Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas: Reglamentación modelo (23.ª ed.).

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). (1994). Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation. U.S. Department of Health and Human Services.

NREL (National Renewable Energy Laboratory). (2016). Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW) Report.

OSHA. (2016). Material handling and storage guidelines.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2019). Guidelines for the environmentally sound management of hazardous materials.

UL (Underwriters Laboratories). (2018). UL 9540: Energy Storage Systems and Equipment.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2019). ADR: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road.

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2025). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2025–2039.

United Nations. (2019). Recommendations on the transport of dangerous goods: Model regulations.

World Bank. (2016). Rural Transport Services and Infrastructure: Policy Guidance Note. Washington D.C.