3. Vías de Tercer Orden (Carreteras Terciarias)



3.1 Caracterización de la vía

Las vías de tercer orden constituyen la categoría de infraestructura vial de mayor extensión en el territorio colombiano y, al mismo tiempo, la de mayores deficiencias estructurales y operativas. Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Colombia cuenta con aproximadamente 142.000 kilómetros de red vial terciaria, de los cuales menos del 10% se encuentra en pavimento y el resto corresponde a afirmado, destapado o trocha en distintos grados de deterioro. Esta red conecta las cabeceras municipales con las veredas y centros poblados rurales, lo que la convierte en el eslabón final —y más crítico— de la cadena logística del programa Colombia Solar, dado que la mayoría de los sistemas fotovoltaicos se instalan precisamente en estas zonas de baja densidad poblacional y alta dispersión territorial.

La superficie de rodadura en estas vías es predominantemente en tierra compactada, recebo o afirmado sin tratamiento, con presencia frecuente de baches profundos, rocas expuestas, surcos de erosión hídrica y tramos inestables en épocas de lluvia. Las pendientes son variables y en muchos casos pronunciadas, superando el 12% en corredores de montaña, lo que introduce riesgos adicionales de pérdida de tracción, deslizamiento y volcamiento, especialmente cuando la superficie está húmeda o cubierta de barro. El ancho de calzada es frecuentemente inferior a cuatro metros,

limitando el cruce simultáneo de vehículos y restringiendo el tipo de camión que puede transitar sin riesgo de volcamiento lateral.

El medio de transporte predominante en estas vías es la camioneta 4x4 de doble cabina o la camioneta de estacas con tracción en las cuatro ruedas, vehículos que permiten cierta adaptación al terreno irregular pero cuya capacidad de carga útil es limitada —entre 800 kilogramos y 1.500 kilogramos según el modelo— y cuya configuración de platón abierto expone la carga a las condiciones ambientales del trayecto. En algunos corredores es posible el ingreso de camiones de menor tonelaje (2 a 5 toneladas), pero su uso está condicionado al estado de la vía, la época del año y la geometría del trazado. La ausencia de señalización, la falta de obras de drenaje funcionales y la inexistencia de mantenimiento rutinario hacen que el estado de estas vías sea altamente variable entre temporadas secas y lluviosas, convirtiendo un trayecto transitable en verano en un corredor intransitable durante el invierno.

Las condiciones climáticas que afectan estas vías dependen de la región, pero en el contexto de Colombia Solar —con énfasis en la región Caribe y zonas de alta irradiación— se caracterizan por períodos secos con generación intensiva de polvo y calor, alternados con temporadas lluviosas que producen encharcamientos, cruces de quebradas activos, deslizamientos y pérdida total de la superficie de rodadura en tramos críticos. La variabilidad interanual introducida por los fenómenos El Niño y La Niña puede intensificar cualquiera de estos extremos, haciendo que una temporada seca excepcionalmente larga endurezca el terreno de forma irregular y aumente las vibraciones, o que una temporada lluviosa intensa corte el acceso durante semanas.

3.2 Análisis de riesgo del transporte

3.2.1 Entrada: traslado de equipos y componentes fotovoltaicos

El transporte de sistemas fotovoltaicos por vías de tercer orden representa el escenario de mayor severidad de riesgo en toda la cadena logística terrestre, no por la probabilidad de un único evento catastrófico, sino por la combinación de factores que actúan de forma simultánea y acumulativa sobre los equipos, las personas y el entorno. Esta acumulación de factores es, precisamente, lo que distingue a este segmento de cualquier otro tramo de la cadena y lo que justifica un tratamiento protocolar diferenciado.

Desde la perspectiva de los equipos, el riesgo dominante es la vibración continua e incontrolada a la que son sometidos los componentes durante trayectos que pueden extenderse entre una y seis horas sobre superficies de alta irregularidad. A diferencia de las vías pavimentadas, donde las vibraciones tienen una frecuencia relativamente predecible que puede ser amortiguada con embalaje adecuado, las vías de tercer orden generan perfiles de vibración aleatorios, con picos de aceleración abruptos producidos por baches, rocas y discontinuidades del terreno que superan con frecuencia los umbrales de tolerancia de los componentes electrónicos y las estructuras laminares de los módulos.

El resultado más crítico de esta exposición es el cracking celular en los paneles fotovoltaicos: microfracturas internas en las celdas de silicio que no dejan evidencia visible pero que se traducen en pérdidas de potencia generativa de entre el 5% y el 30%, degradando el desempeño del sistema

desde antes de su instalación. Este daño, por su naturaleza silenciosa, es además de muy difícil atribución causal una vez el sistema está operando, lo que hace que su costo real —en términos de energía no generada durante la vida útil del proyecto— sea sistemáticamente subestimado.

Los inversores y reguladores de carga, al concentrar la mayor densidad de componentes electrónicos de precisión, son igualmente vulnerables a este perfil de vibración. Los desplazamientos internos de bobinados, el aflojamiento de conexiones y herrajes de sujeción, y las fallas en soldaduras de tarjetas de control son consecuencias documentadas del transporte en superficies irregulares. Un inversor con falla intermitente derivada de daño en transporte puede superar todas las inspecciones visuales de recepción y manifestar su falla únicamente bajo carga eléctrica real, semanas o meses después de la puesta en marcha, en un momento en que la atribución del daño al transporte es prácticamente imposible de sostener sin registros previos. Esta condición tiene implicaciones directas sobre la gestión de garantías y sobre los costos de mantenimiento del programa.

Las baterías de ion-litio introducen en este escenario la dimensión de mayor complejidad regulatoria y de mayor potencial de consecuencias graves. Los golpes y vibraciones extremas pueden deformar las celdas, comprometer la estanqueidad de los contenedores y, en el caso más crítico, generar cortocircuitos internos que activen el fenómeno de fuga térmica. A diferencia de otros componentes, el daño en una batería de litio no siempre se manifiesta de forma inmediata: puede existir un periodo de latencia entre el impacto y la manifestación del evento térmico, lo que implica que una batería aparentemente íntegra al llegar al sitio puede representar un riesgo activo durante el almacenamiento previo a la instalación. En una zona rural con capacidad de respuesta de emergencia limitada, este escenario tiene consecuencias potencialmente irreversibles.

El subsistema de conducción y protección eléctrica, aunque de menor fragilidad intrínseca, enfrenta en las vías de tercer orden una amenaza específica que otros tramos no presentan con la misma intensidad: la exposición al polvo y al barro. En camionetas de platón abierto —el medio de transporte dominante en estos corredores—, el cableado, los conectores MC4 y las cajas de combinación quedan expuestos durante horas a partículas abrasivas que penetran los embalajes convencionales, afectan los sistemas de enclavamiento de los conectores y generan puntos de corrosión en terminales y bornes. Un conector MC4 con su sistema de cierre contaminado por partículas de arena o barro puede no hacer contacto completo durante la instalación, generando resistencias de contacto elevadas que se manifiestan como pérdidas de eficiencia o, en condiciones de alta irradiación, como puntos calientes con riesgo de arco eléctrico.

Las estructuras de soporte y los elementos del subsistema BOS, aunque son los componentes de menor fragilidad electrónica, no están exentos de riesgo en este contexto. Los impactos repetidos contra las paredes del platón, el deslizamiento de perfiles metálicos durante frenadas bruscas —frecuentes en descensos con pendiente pronunciada— y la compresión de elementos de anclaje bajo cargas inadecuadamente distribuidas pueden generar deformaciones geométricas que comprometan el ensamblaje en sitio. La pérdida de tornillería y elementos pequeños de fijación durante el trayecto, por vibraciones que aflojan los cierres de los empaques, es un riesgo que con frecuencia se

materializa sin que sea detectado hasta el momento del montaje, cuando las consecuencias en términos de tiempo y logística de reposición son ya significativas.

Desde la perspectiva de las personas, las vías de tercer orden concentran el mayor riesgo laboral de toda la cadena logística. Los conductores y acompañantes están expuestos durante trayectos prolongados a condiciones de alta exigencia física: vibraciones transmitidas a la cabina, posturas forzadas, fatiga acumulada y estrés de conducción en terrenos donde la pérdida de control del vehículo tiene consecuencias inmediatas. El riesgo de volcamiento es real y documentado en estos corredores, especialmente en tramos con pendiente pronunciada, superficie mojada y carga elevada que modifica el centro de gravedad del vehículo. En el caso del transporte de baterías, un volcamiento puede derivar en un evento de fuga de electrolito o incendio en una zona sin capacidad de respuesta de emergencia, con consecuencias graves para los ocupantes y para el entorno.

La fatiga del conductor, frecuentemente subestimada como factor de riesgo, adquiere especial relevancia en estos trayectos. La conducción en vías de tercer orden exige una atención sostenida de alta intensidad —lectura constante del terreno, decisiones frecuentes sobre línea de manejo, ajustes permanentes de velocidad y tracción— que agota al conductor en tiempos significativamente menores que la conducción en vía pavimentada. En operaciones que implican varios viajes consecutivos al mismo sitio, la degradación del estado de alerta del conductor es un factor que debe considerarse en la planificación de los turnos y las distancias máximas por jornada.

Desde la perspectiva ambiental, el riesgo más relevante en la entrada de equipos está asociado al potencial de contaminación puntual en caso de accidente. Una volcadura de vehículo que transporte transformadores con aceite dieléctrico puede generar un derrame en suelo o cuerpos de agua superficiales en zonas de alta sensibilidad ecológica, muchas de las cuales corresponden a ecosistemas frágiles —rondas de ríos, humedales, laderas con cobertura vegetal nativa— que caracterizan precisamente los corredores de acceso a las comunidades rurales beneficiarias del programa. La capacidad de contención y respuesta ante este tipo de eventos en zonas de tercer orden es prácticamente nula, lo que convierte la prevención en el único mecanismo real de gestión del riesgo ambiental.

3.2.2 Salida: gestión de residuos RAEE y RESPEL

La gestión de residuos en vías de tercer orden introduce una complejidad adicional que frecuentemente no es considerada en la planificación logística inicial: **los mismos factores que dificultan el ingreso de equipos nuevos se aplican**, con igual o mayor severidad, a la salida de materiales deteriorados, componentes defectuosos o residuos al final de la vida útil. **La diferencia fundamental** es que en la salida los materiales han perdido su valor económico como activo, lo que reduce la atención que los operadores logísticos les prestan, incrementando el riesgo de manejo inadecuado.

Los residuos de módulos fotovoltaicos dañados —clasificados como RAEE bajo la Ley 1672 de 2013— contienen en sus estructuras laminares materiales que requieren gestión especializada: plomo en soldaduras de contactos, plata en electrodos de celda y, en tecnologías específicas, cadmio

y telurio en concentraciones que superan los umbrales de peligrosidad definidos por la normativa ambiental. El transporte de estos residuos por vías de tercer orden en platón abierto, sin embalaje de contención adecuado, expone al entorno a la dispersión de fragmentos de vidrio y partículas contaminantes, especialmente si los módulos ya están fracturados. Esta situación no es hipotética: es la condición real que se presenta cuando los residuos son devueltos al operador logístico sin un protocolo de manejo definido.

Las baterías deterioradas o al final de su vida útil constituyen el residuo de mayor complejidad en esta categoría. Clasificadas como RESPEL bajo el Decreto 4741 de 2005, su transporte exige condiciones de embalaje, señalización y documentación que en la práctica son muy difíciles de garantizar en los últimos eslabones de la cadena logística rural. Una batería de plomo-ácido con fuga de electrolito, o una batería de litio con daño estructural, transportada en platón abierto sobre una vía de tercer orden sin los protocolos correspondientes, representa simultáneamente un riesgo para el conductor, para los ecosistemas del corredor vial y para la institucionalidad del programa, dado que el incumplimiento normativo en materia de RESPEL genera responsabilidad legal directa sobre los operadores y, por extensión, sobre el contratante.

3.3 Nivel de riesgo y articulación sistémica

Las vías de tercer orden configuran el escenario de riesgo más alto de toda la cadena logística terrestre del programa Colombia Solar. Esta calificación no responde a un único factor dominante, sino a la convergencia de múltiples condiciones desfavorables que actúan de forma simultánea: superficie irregular que genera vibraciones extremas, pendientes que incrementan el riesgo de pérdida de control, exposición ambiental directa de la carga, capacidad vehicular limitada que puede inducir sobrecargas, ausencia de infraestructura de respuesta ante emergencias y alta variabilidad estacional que hace impredecible el estado de la vía en el momento de la operación.

Lo que convierte a este escenario en especialmente crítico para el protocolo no es solo la severidad de los riesgos individuales, sino su carácter acumulativo y la dificultad de detección posterior. Un sistema fotovoltaico que ha transitado treinta kilómetros de vía de tercer orden en temporada lluviosa puede llegar al sitio de instalación sin ningún daño visible, pero con microfracturas en los módulos, conexiones internas aflojadas en el inversor, conectores contaminados con polvo abrasivo y tornillería faltante en las estructuras. Cada uno de estos daños, considerado individualmente, podría parecer menor. En conjunto, representan una degradación sistemática del rendimiento esperado del sistema que se manifestará a lo largo de toda su vida útil, erosionando silenciosamente los indicadores de generación del programa y los compromisos de energía asumidos con las comunidades.

Esta realidad impone al protocolo de transporte una exigencia concreta: los procedimientos aplicables a vías de tercer orden no pueden ser una versión simplificada de los procedimientos generales. Deben ser protocolos específicamente diseñados para este escenario, con estándares de embalaje reforzado, criterios estrictos de velocidad y conducción, mecanismos de verificación en el punto de transbordo y disposiciones claras sobre las condiciones climáticas bajo las cuales el

transporte debe suspenderse. La ausencia de estos estándares no es una omisión administrativa: es un factor de riesgo activo que compromete la sostenibilidad técnica y operativa del programa.