



**Plan de gestión para el fortalecimiento del ciclo de vida de proyectos solares
fotovoltaicos a gran escala en Colombia**

Manuel Alejandro Pedraza Giraldo

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Maestría en Gerencia de Proyectos
Bogotá, Colombia

13/02/2026

**Plan de gestión para el fortalecimiento del ciclo de vida de proyectos solares
fotovoltaicos a gran escala en Colombia**

Manuel Alejandro Pedraza Giraldo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Gerencia de Proyectos

Director:

William López Castrillón

Modalidad:

Monografía

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá, Colombia

13/02/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 13/02/2026

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante todo este proceso académico. Este logro es también resultado de su constante motivación.

Expreso mi sincero agradecimiento al Dr. William López Castrillón, director de este trabajo de grado, por su invaluable orientación, sus acertadas observaciones y su constante apoyo durante todo el proceso de investigación.

A la Universidad EAN, y en particular a la Facultad de Ingeniería y al programa de Maestría en Gerencia de Proyectos, por brindar las herramientas académicas y el marco institucional que hicieron posible esta investigación.

Finalmente, a todos los investigadores y profesionales cuyos trabajos previos, referenciados en este documento, sentaron las bases conceptuales y metodológicas que hicieron posible esta investigación.

Resumen

Esta investigación propuso un plan de gestión integral para fortalecer el ciclo de vida completo de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia. Mediante una metodología cualitativa documental, se diagnosticó que los principales cuellos de botella en este tipo de proyectos son los trámites prolongados de licenciamiento ambiental y permisos transversales, junto con los retos en la asignación de capacidad de conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN) sujetos a hitos regulatorios y garantías financieras. Estas barreras generan incertidumbre, retrasos y sobrecostos. Como resultado central, se diseñó un plan estructurado en cinco subprocesos: constitución y viabilidad, dirección del proyecto, gestión de riesgos, protocolos de operación y mantenimiento, y plan de cierre y desmantelamiento. El plan incorpora herramientas como cronogramas con reservas para contingencias regulatorias, una matriz de riesgos específica y la previsión de costos por limitaciones de red. En la validación con ocho profesionales del sector, la cobertura promedio global de buenas prácticas proyectada alcanzó un 73,70%, frente al 42,73% de la situación actual, un aumento de 31,3 puntos porcentuales. Se concluye que el plan ofrece un marco para gestionar proactivamente riesgos regulatorios y de infraestructura, mitigando retrasos y sobrecostos, y promoviendo la sostenibilidad de los activos solares en Colombia.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica a gran escala, ciclo de vida de proyectos, gestión integral de proyectos solares, licenciamiento ambiental de proyectos fotovoltaicos, proceso de asignación de capacidad, desmantelamiento de activos solares.

Abstract

This research proposed a comprehensive management plan to strengthen the complete life cycle of utility-scale solar photovoltaic projects in Colombia. Using a qualitative documentary methodology, it was diagnosed that the main bottlenecks in these types of projects are the prolonged environmental licensing and cross-sectoral permitting processes, along with challenges in the allocation of connection capacity to the National Interconnected System (SIN) subject to regulatory milestones and financial guarantees. These barriers generate uncertainty, delays, and cost overruns. As a central result, a plan structured into five sub-processes was designed: project constitution and feasibility, project direction, risk management, operation and maintenance protocols, and closure and decommissioning planning. The plan incorporates tools such as schedules with reserves for regulatory contingencies, a specific risk matrix, and the forecasting of costs due to grid limitations. In the validation with eight sector professionals, the projected average overall coverage of good practices reached 73.70%, compared to 42.73% in the current situation, an increase of 31.3 percentage points. It is concluded that the plan provides a framework for proactively managing regulatory and infrastructure risks, mitigating delays and cost overruns, and promoting the sustainability of solar assets in Colombia.

Keywords: Utility-scale solar photovoltaic energy, project life cycle, comprehensive solar project management, photovoltaic project environmental licensing, capacity allocation process, solar asset decommissioning.

Contenido

	Pág.
Lista de Figuras	10
Lista de Tablas	11
Introducción	12
Objetivos	15
<i>Objetivo general</i>	<i>15</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
Justificación.....	16
Marco Teórico	18
<i>Fundamentos de la gestión de proyectos y su aplicación en energías renovables .</i>	<i>18</i>
<i>El ciclo de vida de los proyectos solares fotovoltaicos.....</i>	<i>22</i>
<i>Gestión de riesgos y el contexto colombiano.....</i>	<i>30</i>
Hipótesis	34
Variables.....	35
Metodología.....	38
Trabajo de Campo.....	44
<i>Diagnóstico nacional: identificación de patrones críticos</i>	<i>44</i>

<i>Oportunidades de intervención estratégica</i>	46
<i>Matriz comparativa integral</i>	46
<i>Análisis de requerimientos técnicos, regulatorios y financieros</i>	52
<i>Complejidad de los requerimientos regulatorios</i>	53
<i>Estructura de requerimientos financieros</i>	54
<i>Análisis de gestión de riesgos específicos</i>	54
<i>Síntesis del diagnóstico</i>	55
<i>Validación con profesionales del sector</i>	56
<i>Análisis de barreras adicionales en la cadena de valor</i>	57
<i>Plan de Gestión Integral para proyectos fotovoltaicos</i>	58
<i>Estructura del plan</i>	58
Discusión	66
Conclusiones y Trabajo Futuro	73
<i>Conclusiones</i>	73
<i>Trabajo futuro</i>	75
Referencias	76
A. Anexo. Metodologías de referencia para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala	85
B. Anexo. Plan para la gestión de proyectos solares fotovoltaicos	89

C. Anexo. Sistema de indicadores (KPIs) para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos.....	94
D. Anexo. Instrumento de validación: cuestionario para entrevistas	99
E. Anexo. Perfiles de las personas entrevistadas	110

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.....	50
<i>Proceso de desarrollo y ejecución de un proyecto solar</i>	<i>50</i>
Figura 2.....	55
<i>Mapa de calor del nivel de cobertura de buenas prácticas en gestión de proyectos solares en Colombia.....</i>	<i>55</i>
Figura 3.....	62
<i>Estructura del plan integral de gestión de proyectos solares fotovoltaicos</i>	<i>62</i>
Figura 4.....	69
Situación actual de cobertura de buenas prácticas en proyectos solares fotovoltaicos en Colombia.....	69
Figura 5.....	70
Situación proyectada tras la implementación del plan integral de gestión.....	70
Figura 6.....	90
<i>Matriz de influencia e interés</i>	<i>90</i>

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1	18
<i>Regulación plantas de energía solar en Colombia.....</i>	18
Tabla 2	24
<i>Comparativo de Metodologías para el ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos.....</i>	24
Tabla 3	35
<i>Variables de la investigación.</i>	35
Tabla 4	47
<i>Matriz comparativa de la gestión actual del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos en Colombia.....</i>	47
Tabla 5	64
<i>Sistema de KPIs para el monitoreo del ciclo de vida de proyectos solares.....</i>	64

Introducción

La transición energética global hacia fuentes de energía renovable se ha acelerado, impulsada por la necesidad de reducir emisiones y alcanzar cero emisiones netas para 2050 (IEA, 2024; REN21, 2024). Esta dinámica se refleja en inversiones récord lideradas por la energía solar (BloombergNEF, 2025). Colombia se alinea con esta tendencia mediante proyectos solares fotovoltaicos a gran escala, que comienzan a diversificar una matriz energética históricamente dependiente de la hidroelectricidad. La capacidad instalada en energía solar conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN) alcanzó 1,74 GW, con proyecciones de crecimiento significativo hacia 2037 (UPME, 2024a).

Sin embargo, este rápido crecimiento evidencia una brecha entre el potencial del recurso solar y los resultados operativos y financieros reales. La expansión acelerada se ve amenazada por fallos recurrentes en la gestión que convierten la oportunidad energética en un riesgo operativo. La evidencia documental del sector en Colombia revela un patrón de retrasos significativos en los cronogramas, atribuibles principalmente a la complejidad y duración de los trámites de licenciamiento ambiental y permisos transversales (UPME, 2024a; Pacheco et al., 2021). Paralelamente, se registran sobrecostos recurrentes, que pueden superar el 12% del presupuesto inicial, originados tanto por estas demoras como por inversiones imprevistas en refuerzos de la red de transmisión (World Bank Group, 2024a; Soto, 2020).

Esta ineficiencia tiene un impacto directo en los objetivos estratégicos del sector empresarial. Cerca del 35% de los proyectos en construcción presentan sobrecostos superiores al 12% por retrasos en trámites (UPME, 2024a, pág. 70), mientras que las limitaciones de red generan inversiones adicionales de 0,8 a 1,5 millones USD por cada 100 MW (World Bank Group, 2024a, pág. 27). Para empresas y fondos de inversión, esto afecta la bancabilidad y retrasa la entrada en operación comercial, comprometiendo el retorno sobre la inversión (KPMG, 2023).

La implementación de un marco de gestión estandarizado se convierte así en una respuesta necesaria para mejorar la eficiencia operativa. Como advierten análisis sectoriales, las deficiencias en gestión estratégica limitan el desarrollo efectivo de proyectos de energía renovable en contextos emergentes (IRENA, 2025; Vega & Muñoz, 2023). Un plan que sistematice procesos y optimice cronogramas permitiría reducir la incertidumbre identificada, acelerar la operación comercial y proteger la rentabilidad. Esta necesidad se alinea con tendencias globales que priorizan la excelencia en ejecución y resiliencia financiera (IEA, 2024; BloombergNEF, 2025).

La UPME¹ (2024a) sintetiza estos obstáculos en barreras regulatorias, limitaciones en infraestructura y deficiencias en gestión estratégica. Esta situación es particularmente aguda en Colombia, donde la capacidad para gestionar proyectos complejos enfrenta desafíos de estandarización (World Bank Group, 2024a).

El crecimiento exponencial del interés de inversionistas, evidenciado por las 1.411 solicitudes de conexión para proyectos solares recibidas por la UPME en 2023, no solo confirma la oportunidad de negocio, sino que también agudiza la urgencia de una intervención en la gestión. Sin un marco estandarizado y adaptado al contexto local, esta avalancha de iniciativas corre el riesgo de materializar y escalar los fallos descritos.

El World Energy Outlook 2024 enfatiza que la seguridad energética y la eficiencia operativa deben integrarse desde la planificación (IEA, 2024). Bajo esta óptica, los proyectos de energía solar deben concebirse como componentes estratégicos del sistema energético nacional. Por ello, fortalecer el ciclo de vida completo mediante esquemas estructurados de gestión se vuelve fundamental.

Frente a este escenario, la propuesta de valor central de esta investigación es un plan de gestión integral diseñado específicamente para reducir la incertidumbre crítica en las

¹ Unidad de Planeación Minero Energética

etapas de desarrollo, construcción y operación. Su valor operativo reside en: (1) anticipar y gestionar la incertidumbre regulatoria mediante herramientas como cronogramas con reservas y matrices de riesgos específicas; (2) mitigar el riesgo de sobrecostos por conexión a través de la evaluación temprana de la capacidad del SIN y previsión presupuestal; y (3) asegurar el desempeño a largo plazo extendiendo el enfoque al ciclo de vida completo, con protocolos estandarizados de O&M y planificación temprana del desmantelamiento.

Por tanto, diseñar un plan de gestión integral adaptado al contexto colombiano no es solo oportuno, sino crítico para consolidar la transición energética del país (UPME, 2024a). Partiendo de este planteamiento, esta investigación se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿Cómo puede la implementación de un plan de gestión de proyectos estructurarse para el fortalecimiento del ciclo de vida y mejorar el desempeño de los proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia?

Objetivos

Objetivo general

Proponer un plan de gestión integral para el ciclo de vida completo con el fin de fortalecer la gestión y mitigar riesgos críticos de sobrecostos, retrasos y bajo desempeño operativo en proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia.

Objetivos específicos

- Elaborar un diagnóstico integral del estado actual de la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia, identificando brechas, fortalezas y cuellos de botella específicos en las fases de desarrollo, ejecución, operación, mantenimiento y desmantelamiento.
- Formular un plan de gestión integral estructurado en subprocesos, que incorpore herramientas, protocolos y procedimientos estandarizados adaptados a los requerimientos técnicos, regulatorios y financieros del contexto colombiano.
- Evaluar la coherencia y adecuación del plan de gestión propuesto frente a los requerimientos y brechas identificadas en el diagnóstico.

Justificación

En Colombia, uno de los principales desafíos para desarrollar proyectos solares fotovoltaicos a gran escala es la ausencia de esquemas de gestión estandarizados. Esta brecha tiene consecuencias cuantificables: la garantía de reserva de capacidad exigida por la CREG (USD 10 por kW asignado) inmoviliza 1 millón de dólares durante el desarrollo de un proyecto de 100 MW, sin herramientas que mitiguen el riesgo de pérdida por retrasos (CREG, 2021; Pacheco et al., 2021). Asimismo, de las 1.411 solicitudes de conexión recibidas por la UPME en 2023 (74,56 GW), solo una fracción logra materializarse en operación (UPME, 2023). Esta situación se relaciona con la "ausencia de proyectos previos que sirvan de referencia", lo cual limita la estructuración técnica y financiera (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Bogotá, 2024, pág. 16). El problema se agrava por cuellos de botella regulatorios, restricciones de conexión y dificultades de acceso a financiamiento (KPMG, 2023).

Aunque el país cuenta con alta radiación solar, la falta de marcos de gestión estructurados sigue siendo una barrera. Vega y Muñoz (2023) destacan que el limitado desarrollo de capacidades técnicas y de gestión ha impedido el avance de proyectos a gran escala. A su vez, la falta de un enfoque basado en el ciclo de vida incrementa el riesgo de sobrecostos, retrasos y bajo rendimiento (World Bank Group, 2024b).

Heineke et al. (2023) sostiene que aplicar un enfoque de gestión del ciclo de vida es clave para la sostenibilidad y el rendimiento técnico de los sistemas. Esto es relevante en Colombia, donde el interés crece: Celsia opera 19 granjas con más de 300 MW y proyecta 1 GW en 2027 (República, 2025), e Isagen junto a Atlas Renewable Energy anunció el desarrollo de hasta 1 GWp en proyectos solares (PV-Tech, 2023).

Un plan de gestión integral adaptado al contexto colombiano puede atender estos desafíos. Según BloombergNEF (2025), países con marcos de gestión bien definidos logran mayores tasas de éxito en el desarrollo y operación de proyectos solares a gran

escala, mejorando la sostenibilidad de los activos y contribuyendo a la seguridad energética.

Esta investigación propone desarrollar un plan de gestión integral para proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia, con el fin de superar las barreras actuales mediante prácticas estratégicas en todas las fases del ciclo de vida, desde la planificación inicial hasta el desmantelamiento.

La urgencia de esta intervención se sustenta en la magnitud del desafío: en el primer semestre de 2024, XM² reportó 40 nuevos proyectos de generación, de los cuales 29 eran solares (XM, 2024), y la UPME monitoreaba 322 proyectos en desarrollo al cierre de 2024 (UPME, 2024b). Sin un marco de gestión que aborde las barreras cuantificadas, el crecimiento proyectado, entre 70% y 85% de capacidad instalada a 2037, con 53% de fuentes no convencionales (UPME, 2024a), corre el riesgo de materializar ineficiencias sistémicas y pérdidas de capital.

² XM: Administradores del mercado eléctrico

Marco Teórico

Fundamentos de la gestión de proyectos y su aplicación en energías renovables

La literatura especializada reconoce que el enfoque clásico centrado en la triple restricción (tiempo, costo y alcance) ha evolucionado hacia concepciones más amplias del éxito del proyecto. En contextos de transición energética, Revinova & Lazanyuk (2025) sostienen que la gestión de proyectos orientada a la sostenibilidad debe enfatizar el valor para los interesados, incluyendo impactos ambientales, y considerar efectos a lo largo del ciclo de vida, alineándose con el triple resultado (económico, social y ambiental). Shah et al. (2023) demuestran que una gestión efectiva (definición de alcance, comunicación, asignación de recursos y gestión de riesgos) es crítica para alcanzar objetivos de sostenibilidad en proyectos de infraestructura, hallazgo extrapolable a proyectos solares fotovoltaicos.

La transición energética global hacia fuentes renovables se ha acelerado, con inversiones récord lideradas por la energía solar fotovoltaica (BloombergNEF, 2025; IEA, 2024). Colombia se alinea con esta tendencia, la capacidad solar conectada al SIN alcanzó 1,74 GW, con 1,36 GW adicionales proyectados en generación distribuida hacia 2037 (UPME, 2024a, pág. 27). La regulación colombiana clasifica los proyectos de energía solar según su capacidad y punto de conexión al SIN. La Tabla 1 resume esta normativa:

Tabla 1

Regulación plantas de energía solar en Colombia.

Resolución	Ámbito de aplicación
------------	----------------------

Resolución CREG ³ 148 de 2021	Plantas eólicas y solares fotovoltaicas (SFV) en los Sistemas de Distribución Locales (SDL) y con capacidad efectiva neta o potencia máxima declarada igual o mayor a 5 MW
Resolución CREG 174 de 2021	Autogeneración a pequeña escala y de la generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional (SIN).
Resolución CREG 101 011 de 2022	Plantas eólicas y solares fotovoltaicas (SFV) en los Sistemas de Distribución Locales (SDL), y con capacidad efectiva neta o potencia máxima declarada igual o mayor a 1 MW y menor a 5 MW
Resolución CREG 060 de 2019	plantas eólicas y solares fotovoltaicas en el Sistema Interconectado Nacional, SIN
Resolución CREG 24 de 2015	Autogenerador a gran escala, que se encuentra conectado al SIN
Resolución UPME 281 de 2015	El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de un (1) MW

Nota. Elaboración a partir de las resoluciones publicadas por la CREG y UPME.

³ Comisión de Regulación de Energía y Gas

Para efectos de este trabajo, se considerará como gran escala todo proyecto de generación y/o autogeneración solar con una capacidad superior a 1 MW y que se conecte al SIN (ya sea a través del sistema de distribución local, de subtransmisión regional o de transmisión nacional), de acuerdo con lo definido por resoluciones de la CREG y lineamientos de la UPME.

Si bien el marco regulatorio permite clasificar los proyectos de energía solar según su capacidad y punto de conexión, la etapa previa a la instalación está condicionada por trámites multisectoriales que definen la duración real del desarrollo, como demoras en licenciamiento ambiental y permisos transversales (arqueología, consulta previa, uso del suelo) prolongan la fase de desarrollo y afectan la previsibilidad del cronograma (UPME, 2024a, págs. 70-71; Pacheco et al., 2021). La Resolución CREG 075 de 2021 introduce hitos tipo "curva S" y garantías de reserva de capacidad (USD 10/kW), elevando costos y riesgo financiero (CREG, 2021; Pacheco et al., 2021). Esta complejidad refuerza la necesidad de integrar desde la planificación una gestión específica de permisos y riesgos regulatorios (UPME, 2024a). Para facilitar la trazabilidad operativa de esta ruta de cumplimiento, en el Plan propuesto se consolida un listado detallado de permisos y licencias en el Apéndice 2 del *Anexo. Plan para la gestión de proyectos solares fotovoltaicos*.

La capacidad para gestionar proyectos de forma consistente y alineada con la estrategia organizacional trasciende el ámbito del proyecto individual. El Standard for Organizational Project Management (OPM) del Project Management Institute (PMI, 2018) establece un marco integrado que articula portafolios, programas y proyectos con los habilitadores organizacionales para entregar valor de manera predecible. Resulta particularmente útil para organizaciones del sector fotovoltaico colombiano que carecen de un enfoque unificado de gestión y operan con prácticas heterogéneas (PMI, 2018).

A nivel global, la ausencia de capacidades de gestión consolidadas tiene consecuencias cuantificables. De acuerdo con el Project Management Institute (PMI, 2020), se estima que en promedio el 11,4% de los presupuestos de proyectos se desperdicia debido a un desempeño deficiente.

En este contexto, el concepto de madurez en gestión de proyectos adquiere relevancia analítica. Al-Marri et al. (2025) definen la madurez como la capacidad de una organización para entregar resultados estratégicos de manera predecible, controlable y confiable, evidenciando su correlación con la reducción de sobrecostos y desviaciones de cronograma. Prasetyo et al. (2025), en el sector de petróleo y gas (análogo por su alta complejidad técnica y regulatoria), demuestran que la madurez en gestión de proyectos tiene un efecto significativo en la capacidad de resiliencia, permitiendo anticipar y absorber interrupciones manteniendo el control sobre cronogramas y costos.

Lo anterior permite sostener que la heterogeneidad de prácticas en el sector fotovoltaico colombiano constituye un síntoma de baja madurez organizacional. La adopción de un marco como OPM, junto con el desarrollo progresivo de capacidades de madurez, ofrecería a las empresas del sector la posibilidad de transitar hacia una gestión predecible y eficiente.

El plan de gestión integral propuesto se fundamenta en estándares internacionales reconocidos. La norma ISO 21502:2021 establece directrices para la gestión de proyectos abarcando gobernanza, beneficios, alcance, cronograma, costos, calidad, recursos, interesados y riesgos, permitiendo enfoques predictivos, adaptativos o híbridos (ISO, 2021). La Guía del PMBOK® (7ª edición, 2021) estructura la gestión en principios y dominios de desempeño, enfatizando la adaptación de procesos y la entrega de valor a lo largo del ciclo de vida (PMI, 2021). Asimismo, PRINCE2® 7 incorpora la gestión por procesos, la integración de datos y la sostenibilidad como objetivos de desempeño (PeopleCert., 2023). Estas referencias se complementan con guías técnicas del

IFC/Banco Mundial e IRENA para proyectos solares fotovoltaicos a gran escala (IFC, 2015; IRENA, 2016).

La complejidad técnica, regulatoria y de coordinación multi-actor que caracteriza a los proyectos de integración de energías renovables exige enfoques de gestión con mayor flexibilidad. Adegboyega et al. (2024) discuten cómo las metodologías ágiles están siendo adaptadas para gestionar la incertidumbre en proyectos de energía, permitiendo ciclos de retroalimentación más cortos y mayor capacidad de respuesta ante cambios regulatorios y de mercado. Pingulkar et al. (2024) plantean la aplicación de principios Lean (eliminar desperdicios, value stream mapping, Kaizen, Just-In-Time) en proyectos solares fotovoltaicos como mecanismos efectivos para reducir retrasos en la cadena de suministro, optimizar coordinación y minimizar desperdicios. Estos enfoques complementan los marcos predictivos, configurando modelos híbridos adecuados para contextos donde coexisten componentes predecibles con alta incertidumbre (PMI, 2021).

Lee et al. (2017) proponen un modelo de gestión de proyectos para la construcción de plantas de energía renovable que integra técnicas de programación como PERT para identificar actividades críticas, estimar duración bajo incertidumbre y evaluar reducción de plazos mediante crashing, así como variantes Fuzzy PERT para incorporar imprecisión en costos de aceleración y penalidades. Esta evidencia metodológica respalda la incorporación en el plan propuesto de cronogramas con reservas para contingencias regulatorias, práctica avanzada de gestión de riesgos.

El ciclo de vida de los proyectos solares fotovoltaicos

(Springer, 2013), en el marco de referencia para el desarrollo de proyectos en el sector de energías renovables desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), plantea que el desarrollo temprano debe concebirse como un proceso de reducción iterativa de incertidumbre, donde el patrocinador enfrenta supuestos desconocidos que requieren inversión incremental. Propone identificar tempranamente

los defectos fatales y organizar el desarrollo en torno a siete dominios críticos: sitio, recurso, acuerdos de largo plazo, permisos, tecnología, equipo y capital. Este marco es particularmente relevante para Colombia: (i) proporciona estructura a la prefactibilidad, área de mayor debilidad (UPME, 2024a; Pacheco et al., 2021), (ii) incorpora la gestión de permisos como dominio crítico, (iii) exige validar acuerdos de largo plazo y financiación antes de comprometer inversiones mayores.

El ciclo de vida de un proyecto de energía fotovoltaica comprende varias fases, desde la planeación y construcción hasta la operación y desmantelamiento. Piwovar-Sulej et al. (2023) proporcionan una guía para el desarrollo de proyectos de energías renovables en Latinoamérica que incluye planeación inicial, implementación, monitoreo y evaluación de impacto, enfatizando que una correcta gestión del ciclo de vida es esencial para la sostenibilidad. En términos generales, el ciclo de vida se compone de pasos que no necesariamente ocurren de forma secuencial: selección de mercado, elección del sitio, estudios y diseños, aprobación regulatoria, aprobación de interconexión, identificación del comprador, financiación, construcción, operación y mantenimiento, y desmantelamiento (The Solar Foundation, 2020).

Existen diversas metodologías utilizadas a nivel mundial para gestionar este ciclo de vida. A continuación, la Tabla 2 presenta una síntesis comparativa de los enfoques del Banco Mundial (IFC), IRENA y la Comisión Europea, las cuales aportan directrices que pueden ser adaptadas al contexto colombiano, el contenido de estas metodologías se amplía en el *Anexo. Metodologías de referencia para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala*.

Tabla 2*Comparativo de Metodologías para el ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos.*

Elemento	Metodología del Banco Mundial	Metodología de IRENA	Metodología de la Comisión Europea para Energía Renovable (UE)	Otras Directrices (ISE, CENER, CER)
Preparación y planificación del proyecto	Evaluación exhaustiva del recurso solar, identificación de sitios, estudios de viabilidad técnica, económica, ambiental y social.	Evaluación del potencial solar, viabilidad técnica y económica, análisis de irradiancia y disponibilidad de tierras.	Identificación y evaluación de recursos solares, análisis de datos meteorológicos e irradiación solar.	Evaluación del recurso solar, estudios de viabilidad técnica y económica.

<p>Diseño e ingeniería del proyecto</p>	<p>Diseño del sistema fotovoltaico, selección de tecnologías y componentes, cumplimiento de normas y regulaciones.</p>	<p>Diseño del sistema fotovoltaico, selección de tecnología, dimensionamiento del sistema, diseño de la disposición.</p>	<p>Diseño del proyecto, selección de tecnología, dimensionamiento del sistema, planificación del sitio.</p>	<p>Diseño del sistema, selección de tecnología, integración en la red eléctrica.</p>
<p>Financiamiento e inversión</p>	<p>Desarrollo de un modelo financiero, identificación de fuentes de financiamiento, negociación de PPAs.</p>	<p>Identificación de fuentes de financiamiento, estructuración de paquetes financieros, cierre de acuerdos.</p>	<p>Soporte financiero y asistencia, programas de financiamiento, subsidios, préstamos preferenciales.</p>	<p>Identificación de fuentes de financiamiento, evaluación de costos y beneficios.</p>

		Obtención de		
	Obtención de permisos	permisos y	Marco regulatorio y	Obtención de
Permisos y	y aprobaciones,	aprobaciones	político, directrices para	permisos, cumplimiento
cumplimiento	cumplimiento de	necesarias,	la obtención de	de normativas locales y
normativo	regulaciones locales e	preparación de	permisos y licencias.	estándares
	internacionales.	documentación del		internacionales.
		proyecto.		
	Desarrollo de un plan	Selección de		Supervisión de
	de construcción	contratistas,	Selección de	construcción,
Construcción e	detallado, control de	supervisión de	contratistas cualificados,	implementación de
implementación	calidad, supervisión de	construcción,	supervisión de	medidas de control de
	actividades de	pruebas y puesta en	construcción, pruebas y	calidad, pruebas y
	construcción.	marcha.	puesta en marcha.	puesta en marcha.

Operación y mantenimiento	<p>Establecimiento de un plan de O&M, inspecciones periódicas, actividades de mantenimiento y monitoreo de desempeño.</p>	<p>Operación eficiente del sistema, mantenimiento preventivo y correctivo, monitoreo del rendimiento.</p>	<p>Implementación de planes de mantenimiento preventivo y correctivo, monitoreo del rendimiento del sistema.</p>	<p>Planes de operación y mantenimiento, inspecciones periódicas, monitoreo del rendimiento del sistema.</p>
Monitoreo y evaluación	<p>Implementación de un marco de monitoreo y evaluación, recopilación de datos relevantes, optimización de esfuerzos futuros.</p>	<p>Monitoreo del desempeño, recolección de datos sobre generación de energía, eficiencia del sistema, métricas financieras.</p>	<p>Evaluación de viabilidad técnica y económica, monitoreo del desempeño, gestión de riesgos operativos.</p>	<p>Monitoreo del rendimiento, recopilación de datos relevantes, evaluación de impacto ambiental y social.</p>

Nota. Elaborado a partir de las características de las principales metodologías.

La gestión y el control son fundamentales, Lee et al. (2017) señalan que una planificación adecuada debe incluir análisis de factibilidad y detección de riesgos, con un control flexible que posibilite el monitoreo del progreso mediante herramientas como EVM y PMIS. Xie et al. (2025) enfatizan que en iniciativas de energía renovable la planificación debe ser especialmente sólida para abordar las incertidumbres del recurso solar y las variaciones en marcos regulatorios y financieros, implementando un enfoque estructurado en etapas. Piwowar-Sulej et al. (2023) destacan que los proyectos exitosos tienden a emplear enfoques de control flexibles que integran planificación anticipada con ajustes progresivos, metodología mixta particularmente ventajosa en países en desarrollo.

El desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos en Colombia está condicionado por barreras estructurales documentadas en la literatura regional. Gómez-Navarro & Ribó-Pérez (2018) identifican obstáculos para la participación de fuentes renovables no convencionales en el mercado eléctrico colombiano, agrupados en dimensiones técnicas, sociales y económicas, destacando los altos costos de inversión/operación, la falta de coordinación público-privada y la ausencia de planeación sistémica. Ruíz Lopez et al. (2020) señalan que el despliegue y la rentabilidad de los proyectos solares en Colombia dependen críticamente de la solidez del marco regulatorio y la existencia de instrumentos de apoyo financiero, con preocupación sectorial por la insuficiencia de incentivos y los elevados precios de equipos. A nivel latinoamericano, Lokey (2009) documenta que los componentes burocráticos e institucionales suelen convertirse en los obstáculos más determinantes para el desarrollo exitoso de proyectos renovables, hallazgo consistente con la tramitología multisectorial como principal cuello de botella en Colombia (Pacheco et al., 2021; UPME, 2024a).

Mehos et al. (2020), en un estudio de mejores prácticas para plantas solares termoeléctricas (CSP) del NREL, identifican que los nuevos participantes en la industria

tienden a "reaprender" los errores en lugar de beneficiarse del conocimiento acumulado por proyectos previos. Este fenómeno justifica la necesidad de consolidar y sistematizar buenas prácticas en documentos de referencia, como el plan de gestión aquí propuesto, para reducir la curva de aprendizaje, evitar retrabajos y mejorar la operación de largo plazo.

La fase de desmantelamiento constituye la etapa final del ciclo de vida y debe planificarse desde el inicio para garantizar la sostenibilidad del proyecto. Esta fase no se limita al retiro físico de la infraestructura, sino que incluye acciones orientadas a la restauración ambiental y la gestión responsable de residuos (SUNPOWER INVEST S.L., 2020; IRENA, 2016). En Colombia actualmente se observa una ausencia de normativa específica para el desmantelamiento de plantas solares, lo que representa un riesgo ambiental y operativo futuro (Martínez, 2020; IRENA & IEA PVPS, 2016).

Hernández-López et al. (2024) presentan una evaluación de ciclo de vida (LCA) de módulos fotovoltaicos que incluye escenarios de transporte y fin de vida, demostrando que los procesos de reciclaje pueden mitigar significativamente los impactos ambientales frente a la disposición en vertederos, aunque advierten que la logística de transporte puede concentrar una fracción considerable del impacto si no se planifica adecuadamente. Yudha et al. (2018) revisan el análisis LCA "de la cuna a la tumba" desde la elección de materiales hasta la disposición final, enfatizando que esta herramienta es central para evaluar la viabilidad ambiental y económica del sistema. Para Colombia, esta literatura adquiere relevancia crítica: el vacío normativo no exime de responsabilidad, y la incorporación de un subproceso de planificación del cierre y desmantelamiento desde la concepción del proyecto alinea la práctica nacional con las tendencias globales de economía circular.

La estructuración contractual de los proyectos es otro pilar fundamental para su viabilidad, actuando como mecanismo clave para la asignación y mitigación de riesgos.

El acuerdo de compra de energía (PPA⁴) establece el flujo de ingresos, el contrato EPC⁵ transfiere los riesgos de diseño, procura y construcción, el acuerdo de conexión regula la interconexión técnica, y el contrato de Operación y Mantenimiento (O&M) garantiza el desempeño a largo plazo (PWC, 2017). La correcta articulación de estos instrumentos es determinante para asegurar la bancabilidad del proyecto (Cabrales & Osorio, 2022).

Gestión de riesgos y el contexto colombiano

La implementación de proyectos solares fotovoltaicos conlleva amenazas inherentes a su ciclo de vida. La administración de riesgos abarca el proceso de reconocer, analizar y reducir las amenazas que podrían comprometer la ejecución y sostenibilidad del proyecto (Gatzert & Kosub, 2016), ellos establecen una taxonomía integral de riesgos en proyectos de energías renovables, clasificándolos en: (i) de política y regulación, (ii) de mercado, (iii) operativos, (iv) tecnológicos, (v) de recursos naturales, y (vi) sociopolíticos. Concluyen que los riesgos regulatorios y de política representan la principal barrera para la inversión en renovables, con cobertura limitada por mecanismos tradicionales y requiriendo innovación en instrumentos de mitigación.

Los riesgos técnicos se vinculan con la tecnología, fiabilidad de equipos y desafíos de instalación y operación, requiriendo correcta elección tecnológica y formación del personal (Kozhakhmetova & Anarkhan, 2024). Los riesgos económicos derivan de la alta inversión inicial, fluctuaciones de precios de insumos, tipos de cambio e incumplimientos de pago (Gatzert & Kosub, 2016). Los riesgos normativos son particularmente críticos en países en desarrollo como Colombia: modificaciones en incentivos tributarios o subsidios pueden repercutir en rentabilidad, y la falta de legislación clara genera incertidumbre (Kozhakhmetova & Anarkhan, 2024).

⁴ PPA por sus siglas en inglés “Power Purchase Agreement”

⁵ EPC por sus siglas en inglés “Engineering, Procurement and Construction”

Hitzeroth & Megerle (2013) introducen el concepto de "riesgos de aceptación" en proyectos de energías renovables, demostrando que las comunidades locales pueden transitar dinámicamente desde posturas de aceptación condicional hacia una oposición activa, afectando la seguridad de la planificación y los costos del proyecto. Los autores sostienen que la aceptación no es un estado binario ni estático, sino un continuo dinámico que debe ser gestionado activamente a lo largo del ciclo de vida, integrando la gestión de interesados como componente central de la gestión de riesgos.

Las estrategias de gestión incluyen evaluación anticipada de amenazas mediante matrices y estudios FODA, diversificación de fuentes de financiamiento, y supervisión y control permanente para identificar desviaciones y aplicar medidas correctivas (Gatzert & Kosub, 2016).

Heidari & Heravi (2024) proponen un enfoque avanzado para la gestión de la incertidumbre de precios y políticas en proyectos fotovoltaicos mediante la teoría de opciones reales, sugiriendo que los PPAs pueden estructurarse con mayor flexibilidad para asignar el riesgo eficientemente entre generador y comprador. Mecanismos como garantías de ingreso mínimo y topes de ingresos permiten adaptar la estructura de ingresos a diferentes escenarios. Esta perspectiva posiciona los contratos como herramientas activas de gestión de riesgos, relevante en Colombia donde la Resolución CREG 075 de 2021 impone hitos y garantías que elevan el riesgo financiero (Pacheco et al., 2021).

Narvaez et al. (2022) evalúan el impacto del cambio climático en el potencial fotovoltaico del suroccidente colombiano mediante modelos climáticos, proyectando variaciones significativas, tanto positivas como negativas, según escenario y subregión, hacia finales de siglo. Este hallazgo implica que el recurso solar no puede tratarse como un dato estático en horizontes de 25-30 años. Incorporar el riesgo climático en los supuestos de producción energética y modelos financieros constituye una práctica

avanzada de gestión de riesgos para garantizar la sostenibilidad de los activos solares en Colombia.

En el contexto colombiano, estos riesgos se materializan en desafíos específicos. La falta de marcos de gestión estructurados limita el escalamiento de proyectos solares (Vega Araújo & Muñoz Cabré, 2023). La UPME (UPME, 2024a) identifica obstáculos regulatorios, limitaciones en infraestructura eléctrica y deficiencias en gestión estratégica, generando sobrecostos, retrasos y bajo desempeño. La rápida evolución tecnológica global (módulos bifaciales, mayores celdas) exige enfoques sofisticados de implementación, adquisición y mantenimiento (ITRPV, 2024; IEA, 2023), y la UPME (2024a) advierte que la expansión acelerada requiere marcos de gestión adecuados para evitar obsolescencia temprana.

El recorrido realizado permite establecer los fundamentos conceptuales y empíricos que sustentan la propuesta de un plan de gestión integral para proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia.

Primero, se ha evidenciado que la dirección de proyectos ha evolucionado hacia un enfoque de creación de valor sostenible que integra dimensiones económicas, sociales y ambientales (Revinova & Lazanyuk, 2025; Shah et al., 2023).

Segundo, se ha establecido que la capacidad organizacional para gestionar proyectos, operacionalizada mediante madurez y resiliencia, es un determinante del desempeño. La baja madurez del sector fotovoltaico colombiano explica las ineficiencias documentadas (Al-Marri et al., 2025; Prasetyo et al., 2025).

Tercero, se han documentado marcos metodológicos robustos (ISO 21502, PMBOK, PRINCE2, IFC, IRENA) complementados con enfoques ágiles y Lean para abordar la incertidumbre (Adegboyega et al., 2024; Pingulkar et al., 2024).

Cuarto, el análisis del ciclo de vida ha permitido: (i) conceptualizar el desarrollo temprano como reducción iterativa de incertidumbre (Springer, 2013), (ii) documentar

barreras estructurales en Colombia y la región (Gómez-Navarro & Ribó-Pérez, 2018; Ruíz Lopez et al., 2020; Lokey, 2009), (iii) identificar la necesidad de sistematizar mejores prácticas (Mehos et al., 2020), y (iv) fundamentar la incorporación del desmantelamiento como componente de sostenibilidad (Hernández-López et al., 2024; Yudha et al., 2018).

Quinto, la revisión de gestión de riesgos ha permitido construir una taxonomía contextualizada que incluye riesgos regulatorios, de aceptación social, de mercado y climáticos, con evidencia empírica para Colombia (Gatzert & Kosub, 2016; Hitzeroth & Megerle, 2013; Heidari & Heravi, 2024; Narvaez et al., 2022).

En conclusión, el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala exige una gestión profesional y sistemática, basada en estándares internacionales y adaptada a los riesgos del contexto colombiano. Integrar un enfoque de ciclo de vida completo, desde la concepción hasta el desmantelamiento, junto con procesos robustos de gestión de riesgos, es indispensable para superar barreras y asegurar la sostenibilidad técnica, económica y ambiental de estos proyectos.

Hipótesis

La implementación disciplinada del plan de gestión integral propuesto para proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia eleva la cobertura promedio de buenas prácticas a un nivel igual o superior al 70% en las fases de desarrollo, ejecución y operación y mantenimiento, mediante la estandarización de herramientas y procedimientos derivados de metodologías formales de gestión de proyectos

Variables

A continuación, se relacionan en la Tabla 3 las variables que definen los atributos que se medirán en la investigación con la recolección de datos. Se presenta la definición conceptual, operacional y clasificación de cada variable.

Tabla 3

Variables de la investigación.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Clasificación
Plan de gestión estructurado	Conjunto organizado de procedimientos, herramientas, metodologías y estándares aplicados sistemáticamente para dirigir y controlar todas las fases de un proyecto solar fotovoltaico, basado en prácticas reconocidas adaptadas a proyectos de energía renovable.	Se analizará la presencia, calidad y nivel de aplicación de planes de gestión en literatura académica, informes técnicos y estudios de caso (criterios: cronogramas, matrices de riesgos, mecanismos de control de calidad, esquemas de seguimiento, entre otros).	Variable Independiente
Fortalecimiento del ciclo de vida del proyecto	Mejoramiento integral de las fases de desarrollo, ejecución, operación y mantenimiento del	Se examinarán reportes y casos documentados que evidencien mejoras en	Variable Dependiente

	<p>proyecto solar, reflejado en reducción de deficiencias y mayor alineación con estándares técnicos.</p>	<p>desempeño (por ejemplo: avances en gestión de riesgos, implementación de mantenimiento preventivo, cumplimiento de estándares de interconexión).</p>	
	<p>Grado en que el proyecto solar cumple con requisitos de diseño, construcción, operación y mantenimiento, garantizando su funcionalidad a largo plazo.</p>	<p>Se revisará literatura y reportes oficiales que documenten indicadores técnicos (eficiencia, fallas reportadas, cumplimiento normativo).</p>	<p>Variable Dependiente</p>
Viabilidad técnica			
	<p>Capacidad del proyecto de generar retornos económicos adecuados y mantener sostenibilidad financiera durante su vida útil.</p>	<p>Se analizarán estudios y documentos que comparen proyecciones y realidades financieras (LCOE, cumplimiento de presupuestos, rentabilidad estimada</p>	<p>Variable Dependiente</p>
Viabilidad económica			

		vs. observada en reportes).	
		Se contrastarán	
	Capacidad de la	informes de operación y	
	operación diaria del	literatura especializada	
Viabilidad	proyecto para mantener	que reporten tasas de	Variable
operativa	niveles de producción y	disponibilidad,	Dependiente
	desempeño proyectados,	ejecución de planes de	
	asegurando continuidad y	mantenimiento y	
	eficiencia.	resolución de	
		incidencias.	

Nota. Elaborado a partir de las variables de la investigación.

Metodología

1. Enfoque, diseño y tipo de investigación

El presente estudio adopta un enfoque cualitativo de investigación aplicada, estructurado en dos fases metodológicas complementarias: (1) una fase documental-analítica centrada en el diagnóstico del contexto nacional, y (2) una fase de validación cualitativa mediante consulta a expertos del sector. Este diseño de investigación cualitativa con triangulación permite comprender de manera profunda los fenómenos asociados a la gestión de proyectos solares fotovoltaicos mediante la integración de fuentes secundarias (literatura científica, técnica y normativa) y fuentes primarias (percepción experta) (Hernández-Sampieri et al., 2018; Duarte & Guerrero, 2024).

La investigación se inscribe en un diseño no experimental, transversal y descriptivo-explicativo, centrado en la interpretación y comparación de información proveniente de múltiples fuentes. Aunque se emplean categorías como independiente y dependiente para organizar las dimensiones de análisis, estas no buscan establecer relaciones estadísticas causales, sino estructurar la sistematización de hallazgos cualitativos.

2. Fases de la investigación

La investigación se estructura en cinco fases, cada una alineada con los objetivos específicos planteados:

Fase 1: Revisión documental y construcción del marco teórico

- Recolección y análisis de literatura académica, informes técnicos, tesis y documentos sobre gestión de proyectos solares fotovoltaicos.
- Sistematización de conceptos clave: ciclo de vida de proyectos, gestión de proyectos, riesgos, metodologías aplicadas, etc.
- Clasificación de la información por dimensiones temáticas y por etapas del ciclo de vida.

Fase 2: Diagnóstico del estado actual de la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos en Colombia

- Análisis documental de casos reales y reportes oficiales de proyectos solares fotovoltaicos ejecutados o en ejecución.
- Evaluación de marcos regulatorios, normativos y técnicos.
- Identificación de brechas, fortalezas y desafíos con base en fuentes secundarias confiables.

Fase 3: Estructuración del plan de gestión

- Identificación de mejores prácticas internacionales y nacionales en gestión de proyectos solares fotovoltaicos.
- Diseño de un modelo de gestión adaptado al contexto colombiano, considerando aspectos técnicos, regulatorios y financieros.
- Propuesta de herramientas como cronogramas, mapas de riesgos, indicadores y formatos estandarizados.

Fase 4: Validación documental del modelo propuesto

- Diseño e implementación de un instrumento de consulta cualitativa dirigido a profesionales con experiencia directa en proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia.
- Recolección y análisis de percepciones expertas para contrastar y enriquecer los hallazgos documentales.
- Estimación de la cobertura actual y proyectada de buenas prácticas mediante escalas de valoración cualitativa.

Fase 5: Sistematización de resultados y elaboración del documento final

- Análisis e interpretación de la información recolectada.
- Redacción de conclusiones, recomendaciones y consideraciones futuras.
- Elaboración del documento de monografía con sus respectivos anexos.

3. Población y muestra

Dado el componente documental del estudio, se definió una estructura documental constituida por:

- Artículos científicos indexados en bases como IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Taylor & Francis.
- Documentos técnicos y guías metodológicas de organismos internacionales (Banco Mundial, IRENA, IEA).
- Informes institucionales y estudios de caso de entidades oficiales colombianas (UPME, Ministerio de Minas y Energía, CREG, XM).
- Normativa nacional vigente relacionada con proyectos de energía renovable.

Para la fase de validación, de 20 profesionales invitados, participaron ocho (8) del sector solar fotovoltaico en Colombia, seleccionados mediante muestreo intencional con base en su experiencia y roles clave. Los criterios de inclusión fueron:

- Experiencia directa en proyectos solares fotovoltaicos a gran escala (>1 MW) conectados al SIN.
- Roles representativos en la cadena de valor (desarrollo, construcción/EPC, financiación, operación).
- Mínimo 2 años de experiencia en el sector.

4. Instrumento de medición y validación

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron dos instrumentos diseñados para los fines específicos del estudio.

Instrumento 1: matriz de análisis documental

Herramienta estructurada en dimensiones predefinidas (fases del ciclo de vida, dimensiones de gestión y fuentes consultadas) que permitió categorizar, sistematizar y

analizar comparativamente la información extraída de los documentos revisados. Su construcción se fundamenta en los principios del análisis de contenido temático y la categorización de información cualitativa, siguiendo los lineamientos generales para la recolección y organización de datos en investigaciones cualitativas (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

Instrumento 2: cuestionario de validación cualitativa.

Instrumento semiestructurado diseñado para la consulta a profesionales del sector solar fotovoltaico a gran escala en Colombia. Su estructura comprende tres bloques: (a) caracterización del participante; (b) evaluación de barreras y brechas identificadas en el diagnóstico documental; y (c) estimación de cobertura de buenas prácticas en escenario actual y proyectado, mediante escalas de valoración cualitativa de 0% a 100%. El instrumento completo se presenta en el *Anexo. Instrumento de validación: cuestionario para entrevistas*. De acuerdo con la clasificación de herramientas de recolección de datos cualitativos propuesta por Hernández-Sampieri & Mendoza (2018), este cuestionario corresponde a la categoría de herramientas formales o semiformales, diseñadas para obtener información estructurada de los informantes mediante procedimientos sistemáticos.

La validación del cuestionario se realizó mediante su aplicación directa a la muestra seleccionada de ocho profesionales del sector, cuyos perfiles se detallan en el *Anexo. Perfiles de las personas entrevistadas*. Los resultados obtenidos, reportados en la Figura 4 y la Figura 5 y analizados en las páginas 54-55, constituyen la validación empírica del instrumento y del plan propuesto. No se realizó un proceso de validación por juicio de expertos previo a la aplicación, por lo que la validez del instrumento se sustenta en su consistencia con el marco teórico, los objetivos de investigación y la evidencia empírica recolectada.

5. Procedimientos y técnicas de análisis de la información

El análisis de la información se apoyará en procedimientos cualitativos de alta rigurosidad, como el análisis de contenido temático, que facilita identificar patrones recurrentes, categorías emergentes, propuestas innovadoras y vacíos existentes en la literatura (Sirwan et al., 2025).

Asimismo, para sintetizar los hallazgos del diagnóstico y proyectar el impacto del plan de gestión propuesto, se diseña e implementa una técnica de análisis basada en mapas de calor y una escala de valoración predefinida. Este procedimiento, se desarrolla en dos etapas:

a) Evaluación del estado actual: el nivel de cobertura de buenas prácticas en el escenario nacional actual se determina mediante un análisis cualitativo con escala numérica. Cada intersección entre fase del ciclo de vida y dimensión de gestión es valorada con un porcentaje (0-100%), el cual representa un juicio fundamentado basado en la evidencia del diagnóstico documental y la siguiente escala:

- 0-30% (muy baja): ausencia de procesos documentados.
- 31-50% (baja): procesos informales y no estandarizados.
- 51-70% (media): implementación parcial de estándares.
- 71-90% (alta): aplicación sistemática de la mayoría de las buenas prácticas.
- 91-100% (muy alta): gestión alineada con altos estándares y procesos de mejora continua.

b) Proyección del impacto: los valores de cobertura proyectada se obtuviesen mediante un análisis de causalidad y un mapeo herramienta-brecha. Para cada celda, se identifican las causas de su valoración y se determina qué componentes del plan integral estaba diseñados para mitigarlas, estimando una mejora realista acorde con la escala.

Finalmente, se aplica triangulación metodológica mediante la comparación de hallazgos provenientes de artículos científicos, estudios de caso y documentos técnicos, con el fin de incrementar la confiabilidad de las conclusiones (Flick, 2018).

La información sintetizada se representará gráficamente por medio de mapas conceptuales, tablas comparativas y matrices cruzadas, que permitirán sistematizar la información y argumentar de manera lógica y estructurada el modelo de gestión propuesto.

Este diseño metodológico permite un abordaje riguroso y fundamentado para el desarrollo del plan de gestión propuesto, sin depender de trabajo de campo directo, y con plena validez académica para una monografía de maestría en gestión de proyectos.

Trabajo de Campo

Diagnóstico nacional: identificación de patrones críticos

El diagnóstico del estado actual de la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia revela patrones críticos recurrentes. A pesar del interés creciente, evidenciado por las 1.411 solicitudes de conexión recibidas por la UPME en 2023 (equivalente a 74,56 GW de capacidad proyectada), y los 322 proyectos de generación en desarrollo al cierre de 2024 (UPME, 2023, 2024), persisten deficiencias estructurales. Entre enero y junio de 2024, XM reportó 40 nuevos proyectos de generación, de los cuales 29 correspondían a tecnología solar de gran escala (XM, 2024), confirmando la dinámica expansiva del sector. Sin embargo, esta expansión enfrenta obstáculos que limitan su eficacia y sostenibilidad a largo plazo.

Según proyecciones de la UPME (2024a), la capacidad instalada total podría incrementarse entre un 70% y 85% para 2037, con hasta un 53% proveniente de fuentes no convencionales como solar y eólica. No obstante, esta expansión enfrenta obstáculos estructurales como la limitada capacidad de infraestructura de conexión, cuellos de botella regulatorios y dificultades en el acceso a financiamiento, especialmente para proyectos en zonas remotas o sin referentes técnicos consolidados (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Bogotá, 2024).

Análisis de causas raíz desde el marco teórico de gestión de proyectos

El análisis de los patrones identificados a la luz del marco teórico establecido revela relaciones causales específicas. La primera causa raíz se relaciona con los vacíos en la aplicación de estándares de gestión durante el desarrollo inicial. Se observa un patrón de prácticas de planificación heterogéneas y carentes de estandarización en la fase de desarrollo. Contrario a los principios del PMBOK (2021) y la ISO 21502:2021, que enfatizan la definición clara del alcance y la identificación temprana de interesados, los proyectos carecen de cronogramas unificados, matrices de riesgos sistemáticas y bancos

de lecciones aprendidas (Torres, 2025). Esta situación se agrava por la dependencia de criterios heterogéneos según el promotor, generando inconsistencia en la calidad de la preparación. Este fenómeno encuentra su explicación teórica en la falta de adopción de metodologías formales de gestión (PMBOK, ISO, IRENA Navigator) identificada por Springer (Springer, 2013), lo cual explica la débil integración entre la planificación técnica y la gestión de riesgos específicos del contexto colombiano documentada por la UPME (UPME, 2024a).

Una segunda causa raíz corresponde a la gestión reactiva versus proactiva de riesgos regulatorios y de infraestructura. Se identifica un patrón de retrasos significativos atribuibles a trámites de licenciamiento ambiental y permisos transversales, y sobrecostos por limitaciones en la capacidad de la red. La teoría de gestión de riesgos (Gatzert & Kosub, 2016) postula la necesidad de identificar, analizar y responder proactivamente a las amenazas. En la práctica colombiana, los riesgos regulatorios (demoras en ANLA/CAR) y de infraestructura (restricciones de red, costo de refuerzos) no son incorporados sistemáticamente en las líneas base de cronograma y costo. La Resolución CREG 075 de 2021, con sus hitos tipo "curva S" y garantías, eleva el riesgo financiero durante el desarrollo, pero no es acompañada de herramientas de gestión que mitiguen su impacto (Pacheco et al., 2021). Esta gestión reactiva contradice el enfoque de ciclo de vida completo promovido por IRENA (2016) y el IFC (2015), donde la evaluación temprana de estos riesgos es fundamental para la bancabilidad del proyecto.

La tercera causa raíz se relaciona con un enfoque operativo centrado en la corrección y la ausencia de planificación del cierre. El patrón observado es el predominio del mantenimiento correctivo y la ausencia de normativa y planificación para el desmantelamiento. El marco de gestión de proyectos orienta hacia la sostenibilidad a largo plazo (Heineke et al., 2023). La predominancia del mantenimiento correctivo sobre el preventivo y predictivo (Jaramillo & Solano, 2019) indica una falla en la planificación de

la calidad y recursos durante la operación. Paralelamente, la ausencia de planificación para el desmantelamiento (Martínez, 2020) omite por completo la fase final del ciclo de vida, generando un pasivo ambiental y financiero futuro. Esta desconexión con la fase de cierre va en contra de las directrices de IRENA & IEA PVPS (IRENA; IEA PVPS, 2016) y de los principios de gestión integral que buscan optimizar el valor a lo largo de toda la vida útil del activo.

Oportunidades de intervención estratégica

Este análisis causal deriva en oportunidades de intervención específicas que fundamentan las estrategias del plan de gestión. La primera oportunidad radica en el desarrollo, donde se puede estandarizar la fase inicial mediante herramientas que obliguen a la identificación temprana de riesgos regulatorios y al establecimiento de líneas base realistas, aplicando los principios del PMBOK y la ISO. La segunda oportunidad se presenta en la ejecución, mediante la implementación de un sistema de gestión de riesgos activo que integre los riesgos locales (regulatorios, de red, sociales) en la planificación y el control, utilizando herramientas como matrices específicas y reservas de contingencia calculadas. La tercera oportunidad abarca la operación y el cierre, a través del diseño de protocolos de operación y mantenimiento (O&M) preventivos y predictivos, y un marco obligatorio de planificación del desmantelamiento desde la concepción del proyecto, alineándose con el enfoque de ciclo de vida completo de IRENA y la búsqueda de sostenibilidad.

Matriz comparativa integral

La siguiente matriz comparativa sintetiza de manera integral las fortalezas, debilidades y retos de la gestión actual del ciclo de vida en Colombia, caracterizando el estado de cada fase:

Tabla 4

Matriz comparativa de la gestión actual del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos en Colombia.

Fase	Fortalezas	Debilidades	Retos
Desarrollo	- Existencia de lineamientos regulatorios básicos (CREG 075 de 2021; Resolución UPME sobre viabilización de proyectos).	- Prácticas de planificación poco estandarizadas: ausencia de cronogramas unificados, matrices de riesgos y bancos de lecciones aprendidas (Torres, 2025).	- Consolidar marcos metodológicos comunes que fortalezcan la planificación integral y permitan mayor homogeneidad en la preparación de proyectos.
	- Creciente interés inversionista y gran número de solicitudes de conexión (más de 1.400 en 2023) (UPME, 2023).	- Dependencia de criterios heterogéneos según el promotor.	
Ejecución	- Uso de herramientas básicas de gestión como cronogramas y reportes de avance (Torres, 2025).	- Limitada adopción de metodologías formales de gestión de proyectos (PMBOK,	- Promover la adopción de estándares internacionales de gestión adaptados al contexto colombiano.

	- Participación de empresas internacionales con experiencia EPC.	ISO 21500, IRENA Navigator) (Springer, 2013).	- Débil integración entre planificación técnica y gestión de riesgos (UPME, 2024a).
Operación y Mantenimiento (O&M)	- Reconocimiento normativo de la necesidad de mantenimiento preventivo y predictivo (UPME, 2022). - Avances iniciales en implementación de monitoreo remoto.	- En la práctica predomina el mantenimiento correctivo (Jaramillo & Solano, 2019). - Escasa experiencia nacional en O&M de proyectos de gran escala (Álvarez et al., 2021).	- Protocolos estandarizados de O&M ajustados al contexto colombiano. - Desarrollo de capacidades técnicas locales para mantenimiento especializado (World Bank Group, 2024a).
Desmantelamiento	- Reconocimiento inicial de la necesidad de planificar el cierre de proyectos y gestionar residuos (IRENA; IEA PVPS, 2016).	- Actualmente se observa una ausencia de normativa específica para el desmantelamiento de plantas solares en Colombia (Martínez, 2020).	- Lineamientos sobre logística inversa y aprovechamiento de materiales (Curtis et al., 2021).

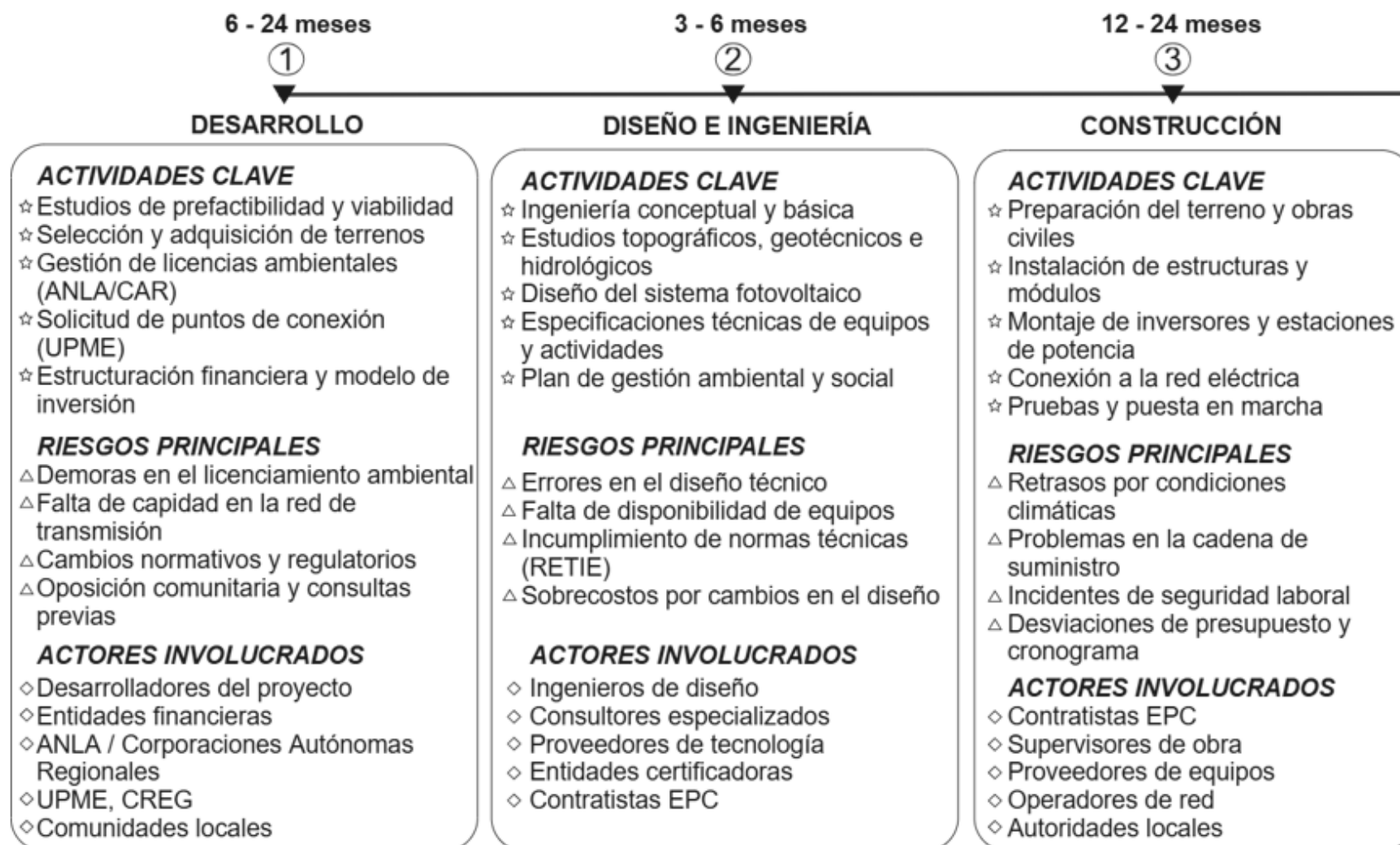
Nota. Elaborado a partir de las características de las principales metodologías.

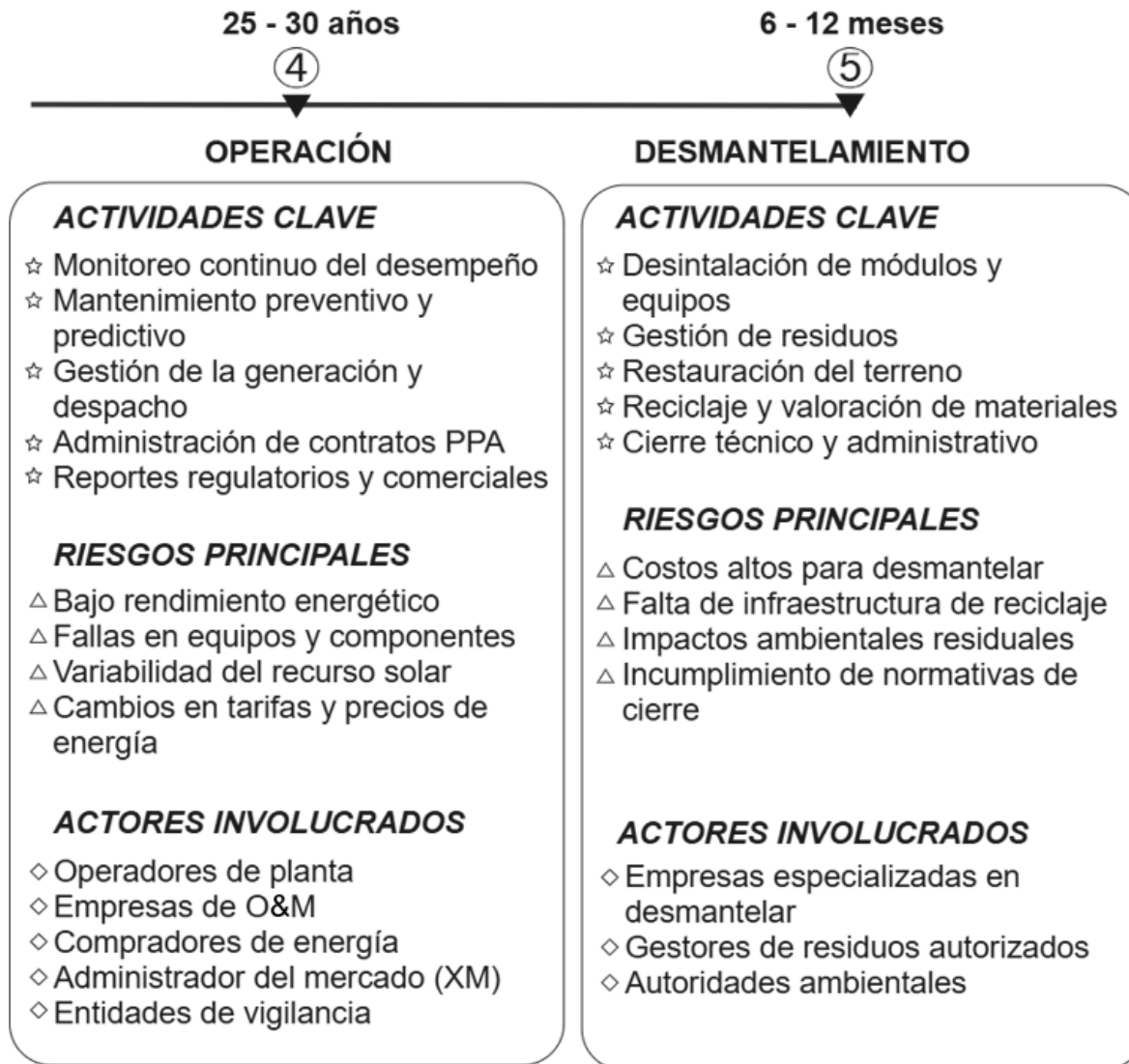
La elección de las metodologías del World Bank/IFC e IRENA como base para el plan de gestión integral responde a su mayor capacidad para abordar las brechas identificadas en la gestión de proyectos solares en Colombia, evidenciadas en la matriz comparativa nacional de la Tabla 4. La guía del World Bank/IFC (International Finance Corporation (IFC), 2015) se distingue por su enfoque en la estructuración financiera, la gestión de riesgos y la bancabilidad, aspectos críticos en mercados emergentes donde predominan la incertidumbre regulatoria y los sobrecostos. Sus herramientas para mitigar riesgos regulatorios y de interconexión, así como la estructuración de contratos clave, permiten responder a debilidades observadas en las fases de desarrollo y ejecución, donde la gestión local es poco estandarizada y la integración de riesgos es limitada.

Por su parte, la metodología de IRENA (IRENA, 2016) aporta un marco de ciclo de vida completo, con énfasis en la planificación técnica, la operación y el mantenimiento, y la gestión del cierre y desmantelamiento. Su enfoque en la estandarización de procesos y la incorporación de indicadores de desempeño permite abordar vacíos en las fases de O&M y cierre, donde la ausencia de protocolos y normativa específica es una de las principales debilidades nacionales. En conjunto, ambas metodologías ofrecen mayor adaptabilidad y especificidad para proyectos solares utilitarios en contextos regulatorios cambiantes, superando a otras alternativas revisadas y facilitando la integración con estándares internacionales de gestión de proyectos.

Figura 1

Proceso de desarrollo y ejecución de un proyecto solar





Nota. Adaptado de “Project Navigator: Utility-Scale Solar Photovoltaic Technical Concept Guidelines”, por (IRENA, 2016).

La Figura 1 muestra de manera esquemática las fases sucesivas de un proyecto solar fotovoltaico a gran escala. Se inicia con la identificación del sitio y la estructuración de estudios de factibilidad, seguido por la obtención de permisos y financiación. Posteriormente, se representan las etapas de construcción, operación y mantenimiento, y finalmente, el desmantelamiento, donde se incluyen actividades de gestión de residuos y reciclaje de los equipos. Este recorrido visual permite comprender cómo se articulan los procesos técnicos, financieros y regulatorios a lo largo del ciclo de vida del proyecto (IRENA, 2016).

Análisis de requerimientos técnicos, regulatorios y financieros

El desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia se encuentra condicionado por un conjunto de factores técnicos, regulatorios y financieros que determinan su viabilidad y sostenibilidad.

Requerimientos técnicos específicos:

La fase de desarrollo constituye un punto crítico, con una duración que suele prolongarse entre 18 y 36 meses, principalmente por la complejidad del licenciamiento ambiental y la multiplicidad de permisos transversales (arqueológicos, consultas previas, uso del suelo) (Pacheco et al., 2021). El licenciamiento depende de la capacidad del proyecto y del nivel de tensión de la infraestructura: proyectos de más de 100 MW requieren la intervención de la ANLA, mientras que los de menor escala recaen en las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).

La conexión al SIN es otro factor determinante, la resolución CREG 075 de 2021 introdujo la "curva S" de hitos obligatorios, que exige a los promotores demostrar avances en terrenos, licencias y adquisición de equipos, y una garantía de reserva de capacidad, lo cual aumenta los costos y los riesgos financieros (CREG, 2021). Además,

los proyectos clase 1⁶ deben presentar de manera obligatoria un estudio de conexión y un estudio de disponibilidad de espacio físico ante la Ventanilla Única de la UPME, documentos que soportan la viabilidad técnica de la conexión al SIN (Pacheco et al., 2021, págs. 38-40).

Un elemento crítico adicional es la capacidad de la red de transmisión y distribución. Como lo identifica Soto (2020) en su estudio, la infraestructura del SIN presenta limitaciones en determinadas regiones, lo que obliga a los desarrolladores a asumir inversiones adicionales en líneas y subestaciones, con implicaciones significativas en el costo total del proyecto y su viabilidad. En algunos casos, estas inversiones adicionales han alcanzado entre 0,8 y 1,5 millones USD por cada 100 MW instalados (World Bank Group, 2024a).

Complejidad de los requerimientos regulatorios

El marco normativo colombiano para las energías renovables se consolidó con la Ley 1715 de 2014 y su actualización en la Ley 2099 de 2021, que promueven la integración de fuentes no convencionales al sistema eléctrico mediante incentivos tributarios y beneficios en depreciación acelerada, IVA y aranceles. A nivel técnico, normas como el RETIE y la NTC garantizan la seguridad y confiabilidad de las instalaciones.

No obstante, el proceso regulatorio sigue siendo uno de los principales cuellos de botella. La tramitología multisectorial, la falta de estandarización en metodologías de evaluación y la incertidumbre normativa generan retrasos significativos y encarecen los proyectos (Pacheco et al., 2021). Además, persiste un vacío normativo sobre la fase de desmantelamiento y la disposición de módulos solares como residuos de aparatos

⁶ Proyecto clase 1: proyectos de conexión de usuarios finales al STN o STR, y proyectos de conexión de generación, cogeneración o autogeneración al SIN diferentes a los proyectos que se encuentren bajo el alcance de la Resolución CREG 030 de 2018, o aquella que la modifique, adicione o sustituya. También se considerarán como proyectos clase 1 las modificaciones que se soliciten a las capacidades ya asignadas (CREG, 2021).

eléctricos y electrónicos (RAEE), lo que representa un riesgo ambiental y financiero a futuro (Martínez, 2020; IRENA & IEA PVPS, 2016).

Estructura de requerimientos financieros

El financiamiento constituye un reto clave para los proyectos de energía solar en Colombia. Aunque existen mecanismos como las subastas de contratos de largo plazo y los acuerdos bilaterales de compra de energía (PPA), los inversionistas enfrentan altos niveles de incertidumbre regulatoria y riesgo de retrasos en interconexión (World Bank Group, 2024a). Para desarrolladores medianos y pequeños, las elevadas exigencias de garantías representan barreras significativas para acceder a créditos bancarios.

En el caso colombiano, la regulación establece una garantía de USD 10 por kW de capacidad asignada para proyectos clase 1, calculada en pesos colombianos con la TRM, que debe mantenerse vigente durante el proceso de desarrollo (Pacheco et al., 2021, pág. 41). Este esquema, si bien busca filtrar proyectos especulativos, representa una barrera de entrada para desarrolladores medianos y pequeños.

La UPME (2024a) señala que cerca del 35% de proyectos solares en fase de construcción presentan sobrecostos superiores al 12% por retrasos en trámites ambientales y de conexión. Estos retrasos y sobrecostos, sumados a las inversiones adicionales en transmisión, han comprometido la bancabilidad de varios proyectos.

Análisis de gestión de riesgos específicos

El análisis de riesgos constituye un eje transversal de los requerimientos técnicos, regulatorios y financieros. Los principales riesgos identificados en el contexto colombiano son: (i) regulatorio, por los cambios en normatividad y la incertidumbre en los tiempos de licenciamiento; (ii) de interconexión, debido a la limitada capacidad de la red y los costos de obras adicionales; (iii) financiero, por la volatilidad de los ingresos esperados y la exigencia de garantías; (iv) técnico, relacionado con fallas en equipos y contratistas; y (v)

social-ambiental, derivado de conflictos por uso del suelo y consultas previas (Caceres et al., 2020, págs. 34-38; Jaramillo & Solano, 2019, págs. 56-59).

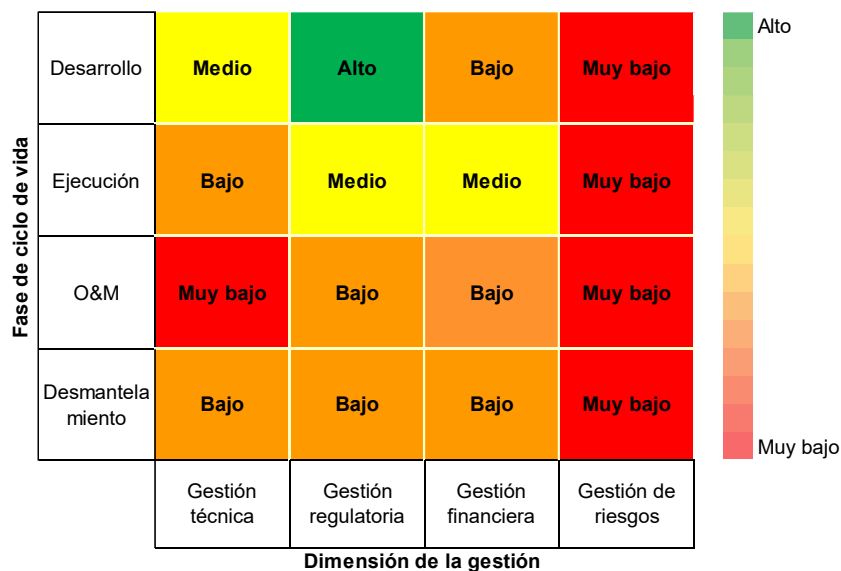
En la "Guía metodológica para el análisis de gestión de riesgos" (Caceres et al., 2024) propone un proceso de identificación, clasificación, valoración y tratamiento de riesgos que puede adaptarse a proyectos de energía solar, aportando un marco sistemático para su seguimiento. En este sentido, la gestión de riesgos puede identificarse directamente sobre las fases del ciclo de vida: Desarrollo (riesgos regulatorios), Ejecución (riesgos técnicos), O&M (riesgos financieros y técnicos) y Desmantelamiento (riesgos ambientales).

Síntesis del diagnóstico

La integración de los hallazgos presentados permite la elaboración de un diagnóstico sintético visual. El mapa de calor de la Figura 2 evalúa el estado de desarrollo de las prácticas de gestión en las diferentes dimensiones y fases del ciclo de vida en el contexto colombiano, revelando la necesidad de una solución estructural.

Figura 2

Mapa de calor del nivel de cobertura de buenas prácticas en gestión de proyectos solares en Colombia



Nota. Elaboración propia.

Como se evidencia en la Figura 2, el análisis cualitativo revela una cobertura deficiente de buenas prácticas con predominancia de niveles 'Bajo' y 'Muy Bajo' en la mayoría de las dimensiones analizadas. Se identifican dos características clave: 1) Existe una capacidad baja para gestionar tareas técnicas internas, pero una falla sistémica en la gestión de factores externos (riesgos regulatorios, financieros y sociales), lo que explica los sobrecostos y retrasos; y 2) la gestión nacional tiende a priorizar la entrada en operación, con menor atención a las fases finales del ciclo, siendo la fase de desmantelamiento una etapa que no se suele tener en consideración.

Validación con profesionales del sector

Para reforzar la trazabilidad y la validez externa del diagnóstico, así como para sustentar con evidencia empírica los valores utilizados en los escenarios de buenas prácticas, se llevó a cabo una validación complementaria. Esta se realizó mediante un cuestionario estructurado dirigido a profesionales del sector solar fotovoltaico a gran escala en Colombia.

Dada la complejidad para acceder a esta población experta, caracterizada por sus altas cargas de trabajo y limitada disponibilidad, se invitó a participar a veinte profesionales preseleccionados. Finalmente, ocho accedieron a completar la entrevista y el cuestionario, lo que constituye una tasa de respuesta del 40% acorde con los desafíos típicos de muestreo en este nicho especializado.

El instrumento aplicado se presenta íntegramente en el *Anexo. Instrumento de validación: cuestionario para entrevistas*. Por su parte, el *Anexo. Perfiles de las personas entrevistadas* detalla el rol y la experiencia de los ocho participantes en proyectos fotovoltaicos conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN), con el fin de contextualizar su juicio experto.

La información recolectada se consolidó para su análisis de forma agregada y anónima. Este análisis permitió contrastar de manera fundamentada el escenario actual

de la industria con el escenario proyectado, bajo el supuesto de una implementación disciplinada de las herramientas del plan propuesto.

Las respuestas se registraron y consolidaron en un archivo de Excel, el cual es un tablero que incluye el mapa de preguntas y su uso en métricas, con el cual se realiza el cálculo automático de promedios e indicadores agregados. Dicho tablero se entrega como Apéndice D1.

La distribución de la experiencia de los consultados por rol principal fue: desarrollador/patrocinador (4), empresa de construcción/EPC (2) y financiador/Inversionista (2). La experiencia reportada se distribuyó en: 2–5 años (3), 6–10 años (3) y menor a 2 años (2).

Para el análisis de cobertura de buenas prácticas, la situación actual (Figura 4) se calcula a partir de las preguntas 18 - 25 (escala 0 - 100), cuyo promedio global reportado por el tablero es 42,73%. La situación proyectada tras la implementación del plan (Figura 5) se calcula a partir de las preguntas 34 - 41 (escala 0 - 100), con un promedio global de 73,23%.

De forma complementaria, el tablero reporta promedios por fase del ciclo de vida, en el escenario actual, los promedios por fase fueron: desarrollo 42,20%; construcción 45,93%; O&M 47,37%; desmantelamiento 28,62%. En el escenario proyectado, los promedios por fase fueron: desarrollo 74,20%; construcción 75,80%; O&M 76,40%; desmantelamiento 66,75%.

Análisis de barreras adicionales en la cadena de valor

El diagnóstico identifica barreras adicionales que afectan el desarrollo de proyectos solares en Colombia. La cadena de abastecimiento global de equipos fotovoltaicos enfrenta dinámicas complejas que impactan los proyectos en Colombia. La dependencia de importaciones de módulos y componentes esenciales genera incertidumbre en costos y disponibilidad, situación que se refleja en las fluctuaciones del mercado internacional

documentadas por los reportes de capacidad renovable (IRENA, 2025). Esta dependencia externa, sumada a los elevados aranceles para algunos equipos y la incipiente producción nacional, incrementa los costos operativos y limita la competitividad del sector solar colombiano, un desafío que también es reconocido en los análisis de mercado global (SolarPower Europe, 2024).

Adicionalmente, existen barreras relacionadas con la oposición o incertidumbre de partes interesadas, prioridades de uso del suelo, falta de sitios adecuados y procesos sin claridad en la aprobación de proyectos (The Solar Foundation, 2020). Los mercados de reparación, reutilización y reciclaje de sistemas fotovoltaicos aún están en una etapa inicial, con ausencia de procedimientos estandarizados para evaluar la seguridad y confiabilidad de reutilizar módulos solares y componentes del sistema (Curtis et al., 2021).

Plan de Gestión Integral para proyectos fotovoltaicos

A partir del diagnóstico nacional que identifica vacíos relevantes en estandarización, gestión de riesgos contextuales y visión de ciclo de vida, se propone un Plan de Gestión Integral para proyectos fotovoltaicos en Colombia. Este busca ser un sistema modular y estandarizable, compuesto por herramientas concretas diseñadas para ser adoptadas por desarrolladores, gestores de proyectos y entidades del sector.

El plan se articula alrededor de un principio central: la gestión proactiva de los riesgos y particularidades del contexto colombiano, integrada en todas las fases del ciclo de vida. Su valor radica en traducir las buenas prácticas internacionales en instrumentos prácticos y específicos para la realidad nacional.

Estructura del plan

La propuesta se materializa en cinco módulos interdependientes, cada uno con entregables concretos que se desarrollan como anexos. En la Figura 3 se puede ver el

mapa que relaciona la relación entre los subprocesos que integran el plan, en relación con el ciclo de vida del proyecto.

Subproceso 1: constitución y viabilidad

Tiene como propósito validar la viabilidad del proyecto desde el inicio, incorporando explícitamente los riesgos y requisitos colombianos. Sus componentes clave son: 1) Acta de Constitución, que corresponde a una plantilla que incluye secciones específicas para declaración de riesgos regulatorios iniciales, requisitos de garantías ante la UPME e identificación temprana de partes interesadas críticas (ANLA, CARs, comunidades). 2) Estudio de Prefactibilidad, metodología que exige además del análisis de recurso solar, la evaluación obligatoria de la capacidad de la red local y costos potenciales de refuerzo, el análisis preliminar de licenciamiento ambiental (ANLA vs. CAR); así como la estimación de tiempos y costos de permisos transversales (arqueología, consulta previa).

Subproceso 2: plan para la dirección del proyecto

Busca establecer una línea base realista y resiliente, que anticipe contingencias típicas del país. Como componentes tiene: 1) Estructura de Desglose de Trabajo (EDT) Estándar, de referencia para proyectos solares a gran escala en Colombia, que incluye paquetes de trabajo específicos como gestión de permisos ante la ANLA/CAR, proceso de interconexión con Transportador, implementación de un plan de gestión social. 2) Cronograma con reservas para contingencias regulatorias, para calcular e incorporar reservas de tiempo en el cronograma maestro, basadas en las estimaciones de demoras en licenciamiento e interconexión. 3) Línea base de costos, presupuesto que incluye una partida específica y cuantificada para costos potenciales de refuerzo de red, basada en análisis de la infraestructura del SIN en la zona del proyecto.

Subproceso 3: Sistema de gestión de riesgos

Pretende identificar, analizar y planificar respuestas para los riesgos más probables e impactantes en el contexto local. Su componente clave: 1) Matriz de riesgos: una matriz base poblada con los riesgos críticos identificados en el diagnóstico.

Subproceso 4: Protocolos de operación y mantenimiento (O&M)

Su propósito es maximizar la generación de energía y la vida útil de la planta, adaptándose a las condiciones climáticas y de disponibilidad técnica local. Como componentes clave tiene: 1) Plan de gestión de recursos para O&M, que define los roles, responsabilidades y competencias técnicas requeridas para el equipo de O&M, con énfasis en el desarrollo de capacidades locales. 2) Plan de gestión de la calidad para O&M, el cual establece los protocolos de mantenimiento preventivo y predictivo, los estándares de desempeño y los procedimientos para la gestión de no conformidades en la operación. 3) Procedimiento estándar de monitoreo y reporte, que define la frecuencia, los parámetros a medir y los formatos para reportar el desempeño de la planta.

Subproceso 5: Plan de cierre y desmantelamiento

Garantiza el cierre financiero, ambiental y socialmente responsable del proyecto, desde la etapa de planificación. Sus componentes clave: 1) Gestión del alcance para el desmantelamiento, el cual define los entregables del cierre (ej. terreno restaurado, equipos vendidos o reciclados, permisos de cierre obtenidos). 1) Gestión de costos para el fin de vida, que establece la metodología para estimar y provisionar financieramente los costos de desmantelamiento y gestión de residuos, desde la fase de desarrollo del proyecto. 3) Gestión de residuos para los módulos fotovoltaicos, que es el procedimiento específico para el desensamble, clasificación, transporte y disposición final/reciclaje de los módulos solares.

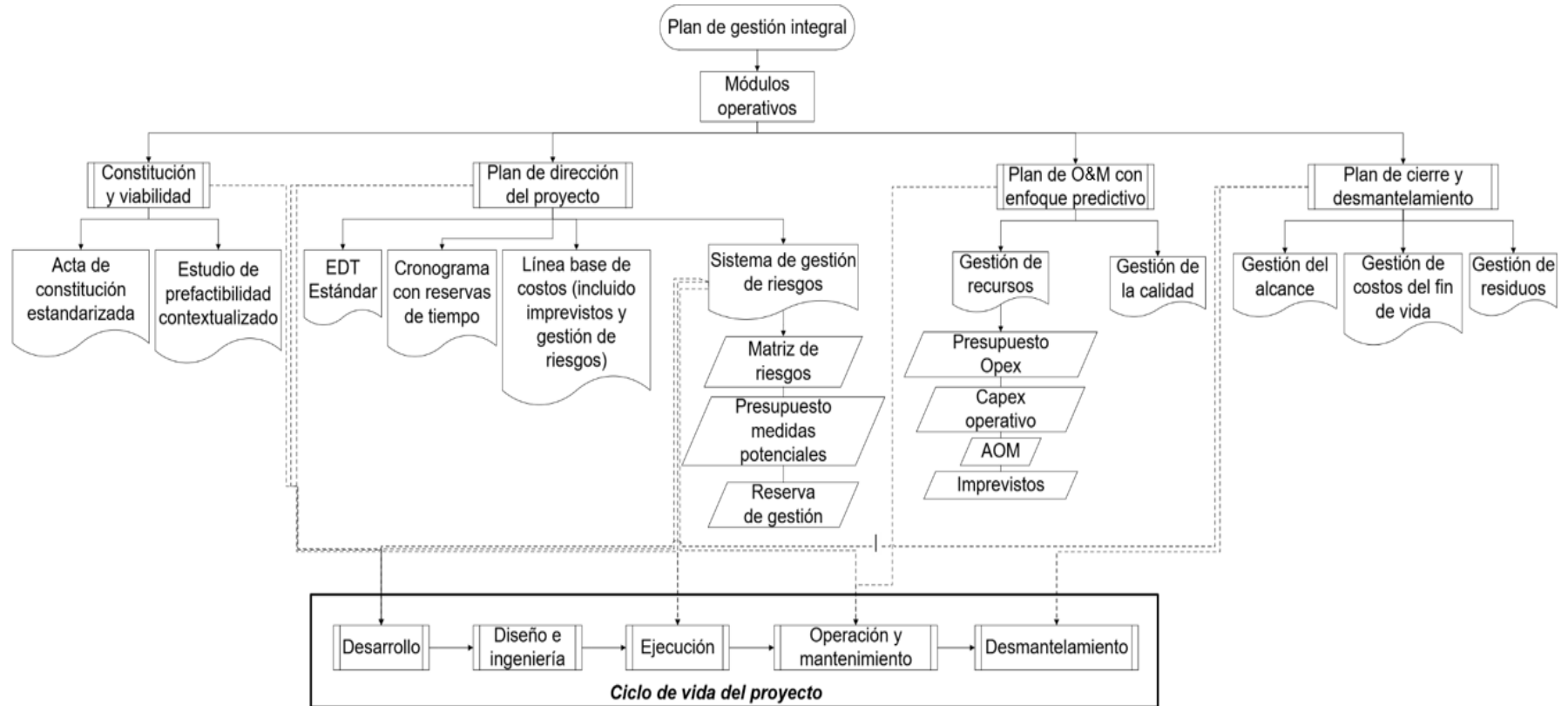
En el *Anexo. Plan para la gestión de proyectos solares fotovoltaicos* se detalla en qué consiste la estructuración del plan, el cual cuenta con 6 apéndices que son los formatos y plantillas diseñados para estandarizar la implementación del plan de la Figura 3, así

como un manual que busca describir cómo se debe gestionar, ejecutar y controlar el proyecto. El listado de documentos es el siguiente:

- Manual del plan de gestión.
- Apéndice 1 - Biblioteca de riesgos proyectos FV.
- Apéndice 2 - Listado de permisos y licencias.
- Apéndice 3 - Costos y actividades proyecto FV.
- Apéndice 4 - Plan O&M preventivo proyecto FV.
- Apéndice 5 - Cronograma proyecto FV.
- Apéndice 6 - Matriz de riesgos.

Figura 3

Estructura del plan integral de gestión de proyectos solares fotovoltaicos



Nota. Elaboración propia.

Este plan integral de gestión constituye una respuesta estructurada a los hallazgos del diagnóstico nacional, proponiendo herramientas estandarizadas para contrarrestar la falta de homogeneidad en la gestión de proyectos solares. Frente a la debilidad en la integración de riesgos evidenciada en el mapa de calor, el plan establece un sistema de gestión de riesgos estandarizado como módulo central y transversal, permitiendo la mitigación proactiva de las amenazas específicas del contexto colombiano. Asimismo, para resolver la problemática del ciclo de vida incompleto, incorpora un módulo dedicado al desmantelamiento que obliga a planificar el fin de vida del proyecto desde su etapa de diseño, cerrando así la ausencia de normativa y procedimientos específicos.

Tras la presentación de la estructura del plan integral en la Figura 3, se establece un sistema de indicadores clave de desempeño (KPIs) que permite monitorear de manera objetiva el avance y la calidad de cada fase del ciclo de vida. Como se muestra en la Tabla 5, el sistema integra KPIs específicos para cada etapa, desde el desarrollo hasta el cierre.

Los KPIs propuestos cumplen una doble función: por un lado, proporcionan métricas cuantitativas para la toma de decisiones basada en datos y, por otro, establecen umbrales de alerta temprana que permiten intervenciones.

La selección de estos KPIs responde a la necesidad identificada en el diagnóstico nacional de contar con herramientas estandarizadas de medición que aborden tanto aspectos técnicos como de gestión.

El detalle de cada KPI se presenta en el *Anexo. Sistema de indicadores (KPIs) para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos.*

Tabla 5*Sistema de KPIs para el monitoreo del ciclo de vida de proyectos solares*

Fase	KPIs	Fórmula de cálculo	Finalidad
Desarrollo	Complejidad estudios de factibilidad	$\%E.F. = \frac{\text{Número de estudios completados y aprobados}}{\text{Total de estudios requeridos}} \times 100$	Validar viabilidad y preparación
	Eficiencia en licencias	$\%O.L. = \frac{\text{Días reales de trámite}}{\text{Días planificados en cronograma}} \times 100$	
	Gestión temprana de riesgos	$\%I.T.R. = \frac{\text{Riesgos críticos identificados y con plan de mitigación}}{\text{Total de riesgos críticos identificados}} \times 100$	
Diseño	Avance documentación ingeniería	$\%A.D.I. = \frac{\text{entregables ejecutadas en ingeniería}}{\text{entregables de ingeniería planificados}} \times 100$	Asegurar calidad técnica y optimización
Construcción	Desempeño cronograma	$I.D.CR. = \frac{\text{Valor ganado (EV)}}{\text{Valor planificado (PV)}}$	Controlar ejecución y recursos
	Desempeño costos	$I.D.CT. = \frac{\text{Valor ganado (EV)}}{\text{Costo real (AC)}}$	
Operación	Performance Ratio (PR)	$\%PR = \frac{\text{Energía real generada AC}}{\text{Energía teórica AC esperada}} \times 100$	Maximizar eficiencia y rentabilidad
	Disponibilidad planta	$\%Disp = \frac{\text{Horas operativas} - \text{Horas de parada no planificada}}{\text{Horas totales del período}} \times 100$	
	LCOE - Costo energía	$LCOE = \frac{\text{Costos totales de inversión} + \text{O\&M} + \text{desmantelamiento}}{\text{Energía total generada en vida útil}}$	
Cierre	Valorización de materiales	$\%Desm = \frac{\text{Peso de materiales valorizados}}{\text{Peso total de materiales desmantelados}} \times 100$	Garantizar sostenibilidad y cierre formal
	Cumplimiento plan cierre	$\%P.C. = \frac{\text{Actividades de cierre completadas según plan}}{\text{Total de actividades de cierre}} \times 100$	

Nota. Elaboración propia.

La aplicabilidad del plan se garantiza mediante su desarrollo práctico en anexos, donde cada componente clave, como la estructura de desglose del trabajo estándar, la matriz de riesgos y los protocolos de gestión de residuos, puede ser especificado en detalle. Esta característica transforma la propuesta de un marco conceptual en un conjunto de herramientas concretas y listas para implementar, facilitando su adopción por los diversos actores del sector.

En consecuencia, la implementación de este plan integral de gestión permitiría mitigar los riesgos sistémicos identificados en el diagnóstico, sentando las bases para un despliegue eficiente, sostenible y a gran escala de la energía solar en el país, alineado con los objetivos de la transición energética nacional.

Discusión

Este estudio partió de la hipótesis de que la estructuración de un plan de gestión integral incrementaría sustancialmente la cobertura de buenas prácticas en el ciclo de vida de los proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia. Los resultados del diagnóstico nacional validan esta hipótesis, al revelar una cobertura deficiente y desigual de prácticas de gestión estandarizadas. Sin embargo, el análisis posterior demuestra que el desafío trasciende la aplicación de estándares genéricos. El plan busca contribuir a reducir la brecha entre los modelos internacionales y la realidad operativa, regulatoria y social del país.

Para someter a prueba la hipótesis planteada, se empleó un método de juicio experto estructurado, consistente en un cuestionario aplicado a ocho profesionales del sector solar fotovoltaico colombiano con experiencia directa en proyectos >1 MW conectados al SIN (cuyos perfiles se detallan en el *Anexo. Perfiles de las personas entrevistadas*). El instrumento *Anexo. Instrumento de validación: cuestionario para entrevistas* solicitó a los participantes estimar, en una escala de 0% a 100%, el nivel de cobertura de buenas prácticas en dos escenarios: (i) situación actual del sector, y (ii) situación proyectada bajo el supuesto de implementación disciplinada de las herramientas del plan propuesto (responsables definidos, reuniones de control, documentación y seguimiento).

Los resultados, consolidados en la Figura 4 (situación actual) y Figura 5 (situación proyectada), arrojaron un promedio global de cobertura de buenas prácticas del 42,73% para el escenario actual y del 73,70% para el escenario proyectado, lo que representa un incremento de 31,3 puntos porcentuales.

El valor proyectado (73,70%) supera el umbral del 70% establecido en la hipótesis para la cobertura promedio de buenas prácticas en las fases de desarrollo, ejecución y operación y mantenimiento.

Los promedios proyectados por fase (desarrollo: 74,20%; construcción: 75,80%; O&M: 76,40%) se sitúan consistentemente por encima del 70%, mientras que la fase de desmantelamiento (66,75%), aunque no estaba explícitamente incluida en la hipótesis, también muestra una mejora sustancial respecto al 28,62% actual.

Es importante precisar que esta validación corresponde a una estimación basada en juicio experto estructurado y no a una medición empírica derivada de la implementación piloto del plan, lo cual constituye una limitación que se reconoce y que se propone como línea de trabajo futuro.

El diagnóstico evidenció que las mayores debilidades no se encuentran en la ejecución técnica, que muestra un nivel medio-alto de desarrollo, sino en la gestión proactiva de la incertidumbre contextual y en la visión integral del ciclo de vida. La gestión de riesgos específicos del contexto colombiano y la fase de desmantelamiento obtuvieron consistentemente la calificación más baja en todas las dimensiones analizadas. Este hallazgo no solo confirma el planteamiento de Gatzert & Kosub (2016) sobre la necesidad de una administración de riesgos proactiva, sino que lo amplía al señalar que, en mercados emergentes como el colombiano, los riesgos más críticos son predominantemente exógenos (regulatorios, de infraestructura, sociales) y, por lo tanto, requieren estrategias de mitigación específicas y localizadas que los estándares internacionales no suelen contemplar en profundidad.

El patrón de gestión reactiva identificado en el sector es sintomático de un enfoque centrado en superar las barreras inmediatas para llegar a la operación, descuidando la sostenibilidad a largo plazo. La concentración de esfuerzos en la fase de ejecución, en detrimento de una planificación robusta durante el desarrollo y una visión que incluya el O&M especializado y el desmantelamiento, constituye un factor relevante de los sobrecostos recurrentes (hasta 15%) y los retrasos documentados (UPME, 2024a; Pacheco et al., 2021). Esta situación se alinea con las advertencias de Springer (2013) y

el World Bank Group (2024a) sobre las consecuencias de la ausencia de marcos de gestión estandarizados. No obstante, este estudio avanza al especificar que la estandarización, para ser efectiva en Colombia, debe ser contextualizada. El plan propone que esta estandarización incorpore de forma obligatoria componentes que aborden explícitamente los cuellos de botella locales, como los hitos de la "curva S" (CREG 075 de 2021) y las limitaciones estructurales de la infraestructura de transmisión, transformando la gestión de riesgos de una práctica reactiva a una columna vertebral de la planificación.

La limitación más significativa de esta investigación reside en su dependencia metodológica de fuentes secundarias. Si bien este enfoque fue coherente con la naturaleza exploratoria-descriptiva del estudio y con las restricciones de viabilidad, impide una validación empírica directa de la propuesta del plan a través de la aplicación en casos reales o la consulta estructurada a actores sectoriales. Esta limitación plantea interrogantes sobre la validez externa del plan; es decir, sobre cómo será recibido, adaptado e implementado por desarrolladores, contratistas y entidades regulatorias en la práctica, con sus diversas capacidades, incentivos y culturas organizacionales.

Para contrarrestar esta limitación, se desarrolló un comparativo de estimación basado en el diagnóstico cualitativo a valores porcentuales.

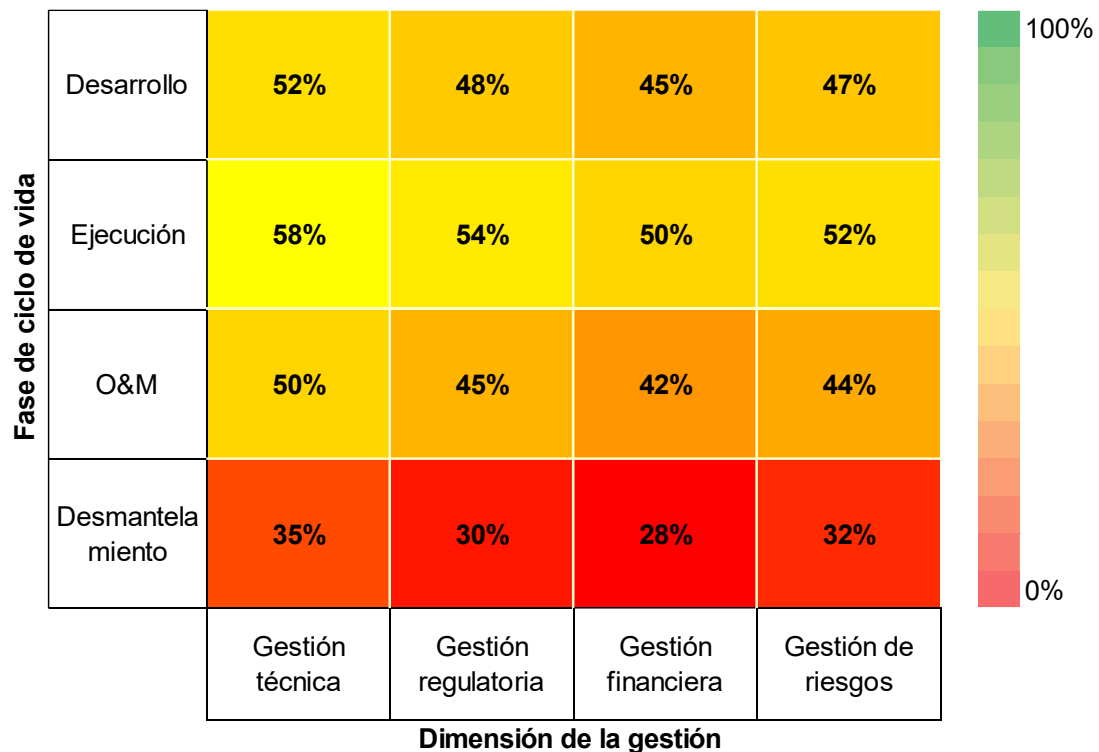
Como resultado de la aplicación de la metodología de evaluación descrita al inicio de este documento, específicamente del análisis cualitativo con escala numérica sobre los hallazgos del diagnóstico documental, se obtienen los resultados de la Figura 4. Como ejemplo de aplicación: la dimensión "Gestión regulatoria" en la fase de "Desarrollo" se calificó con un 28% (muy baja) debido a hallazgos como demoras en licencias ambientales (UPME, 2024a), que evidencian una ausencia de procesos estandarizados.

La limitación más significativa de esta investigación reside en su dependencia metodológica de fuentes secundarias. Si bien este enfoque fue coherente con la

naturaleza exploratoria-descriptiva del estudio y con las restricciones de viabilidad, impide una validación empírica directa de la propuesta del plan a través de su aplicación en casos reales. No obstante, esta limitación se mitiga parcialmente con la incorporación del cuestionario aplicado a profesionales del sector, el cual aporta evidencia empírica de apoyo y permite trazabilidad explícita del origen de los valores usados en la Figura 4 y Figura 5.

Figura 4

Situación actual de cobertura de buenas prácticas en proyectos solares fotovoltaicos en Colombia



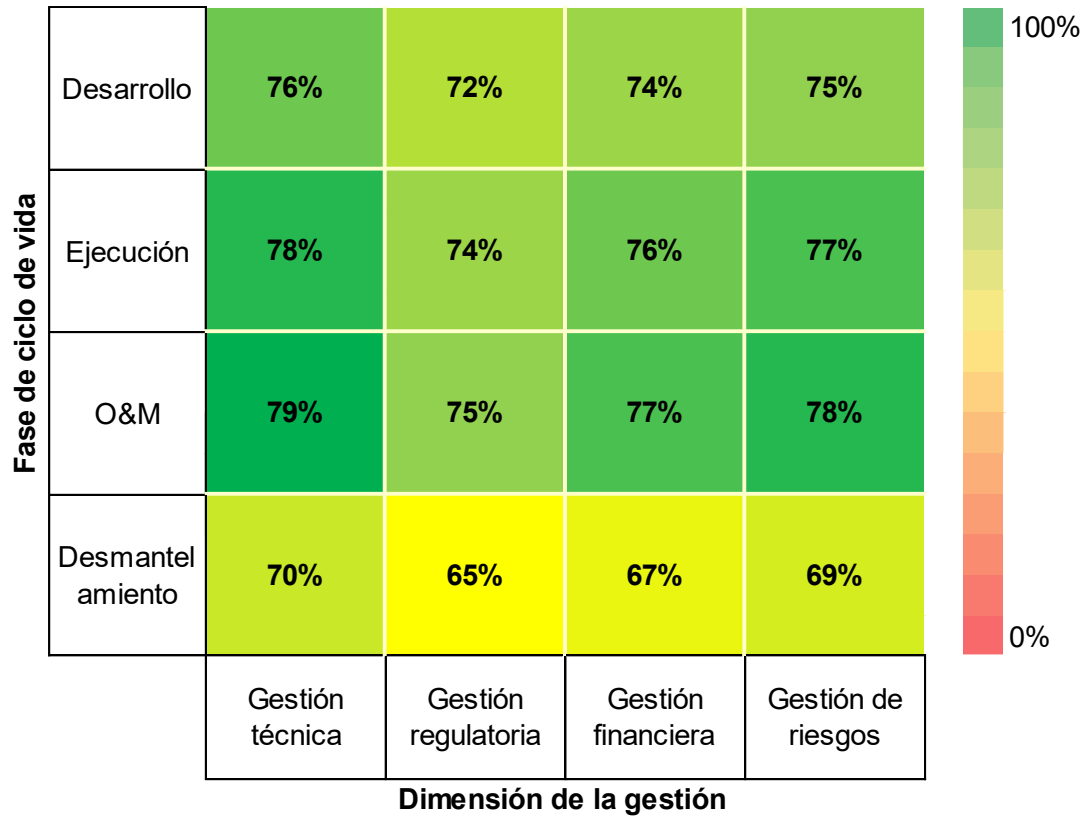
Nota. Elaboración propia.

La Figura 4 presenta el mapa de calor de la situación actual calculado con base en las respuestas 18 - 25 del cuestionario (escala 0 - 100), consolidadas en el tablero. El promedio global reportado es 42,73%, y los valores observados en las respuestas individuales para este bloque se ubican entre 20% y 60%.

La Figura 5 visualiza el escenario proyectado tras la implementación del plan, calculado con base en las respuestas 34 - 41 (escala 0 - 100), bajo el supuesto explícito del instrumento de implementación disciplinada (responsables, reuniones de control, documentación y seguimiento).

Figura 5

Situación proyectada tras la implementación del plan integral de gestión.



Nota. Elaboración propia.

El incremento del promedio global desde 42,73% (escenario actual) hasta 73,70% (escenario proyectado) evidencia la magnitud de mejora estimada por los participantes en términos de cobertura de buenas prácticas. Para el bloque 34 - 41, los valores observados en las respuestas individuales se ubican entre 66% y 88%.

El contraste entre ambas figuras revela un incremento promedio de 31,3 puntos porcentuales en la cobertura de buenas prácticas (mejora absoluta promedio reportada).

Este resultado debe interpretarse como una estimación basada en juicio experto estructurado (escala 0 - 100) y no como un efecto causal verificado mediante implementación piloto.

Para lograr esto, se implementó una estrategia de triangulación de fuentes para fortalecer la validez interna del diagnóstico. La consistencia de los hallazgos a través de fuentes diversas y de alta credibilidad, literatura académica, informes de organismos internacionales (World Bank, IEA, IRENA) y, datos y reportes oficiales de entidades nacionales (UPME, XM, MME), robustece significativamente la pertinencia y fundamentación de la problemática identificada y de la necesidad de una solución estructural.

Otra limitación que considerar es la potencial rigidez de un marco estandarizado. Existe el riesgo de que el plan sea percibido como un instrumento rígido que no logre adaptarse a la heterogeneidad de proyectos (en tamaño, ubicación, tecnología) y a la dinámica evolutiva del sector. La futura actualización del plan dependerá de la creación de mecanismos de retroalimentación y aprendizaje continuo que permitan su refinamiento, un aspecto que escapa al alcance de este trabajo pero que es fundamental para su sostenibilidad a largo plazo.

Superando estas limitaciones, la discusión central sostiene que el plan no debe concebirse simplemente como un conjunto de buenas prácticas, sino como una herramienta estratégica para la mejora en la ocurrencia de la transición energética colombiana. Al estandarizar la gestión de riesgos locales e incorporar el desmantelamiento y la economía circular desde la concepción misma de los proyectos, el plan puede trascender su función operativa. Transforma la gestión de proyectos actual de una actividad tácita y reactiva en una ventaja competitiva y de sostenibilidad explícita para el sector nacional.

Esto responde directamente al objetivo general de la investigación ya que provee la creación de un marco accionable y estandarizable que permita materializar el potencial solar de Colombia de manera eficiente, resiliente y ambientalmente responsable. El plan se erige así no como un fin, sino como un habilitador para una transición energética de mayor calidad, donde el crecimiento cuantitativo, evidenciado por las proyecciones de la UPME (2024), esté sustentado en cimientos de gestión sólidos y adaptados a la realidad nacional. Su implementación sería fundamental para mitigar los riesgos identificados y garantizar que los proyectos no solo se construyan, sino que operen de manera óptima durante su vida útil y se cierren de manera responsable.

Conclusiones y Trabajo Futuro

Conclusiones

En respuesta a la pregunta de investigación, se concluye que la implementación de un plan de gestión integral, estructurado en cinco subprocesos interdependientes y adaptado al contexto colombiano, constituye el mecanismo efectivo para fortalecer el ciclo de vida y mejorar el desempeño de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia. Esta conclusión se sustenta en los hallazgos directos de cada objetivo específico.

En primer lugar, el diagnóstico confirmó que las deficiencias en la gestión actual tienen impactos cuantificables: aproximadamente el 35% de los proyectos presentan sobrecostos superiores al 12% del CAPEX, y los retrasos por trámites ambientales y de conexión prolongan la fase de desarrollo entre 18 y 36 meses. El plan propuesto mitiga esta causa raíz al estandarizar la etapa de prefactibilidad, incorporando herramientas como cronogramas con reservas para contingencias regulatorias y una matriz de riesgos base específica para el contexto local. La validación con profesionales del sector proyecta que esta estandarización elevaría la cobertura de buenas prácticas en la fase de desarrollo desde un 42,20% hasta un 74,20%.

En segundo lugar, el análisis causal evidenció que la gestión reactiva de riesgos de infraestructura genera inversiones adicionales no presupuestadas, que pueden alcanzar entre 0,8 y 1,5 millones de USD por cada 100 MW instalados. El subproceso de gestión de riesgos del plan, con su evaluación temprana de la capacidad de la red y previsión presupuestal explícita para refuerzos, está diseñado para reducir esta incertidumbre financiera. La proyección de cobertura para la fase de construcción aumentaría del 45,93% al 75,80%, reflejando una mayor capacidad de control.

Finalmente, se concluye que la incorporación de protocolos de operación y mantenimiento (O&M) preventivos y de un plan de desmantelamiento desde la

concepción del proyecto es necesaria para garantizar la sostenibilidad del activo. El diagnóstico identificó que el predominio del mantenimiento correctivo y la ausencia de lineamientos para el cierre generan un pasivo operativo y ambiental. La implementación de estos componentes proyecta mejorar la cobertura en O&M del 47,37% al 76,40% y en desmantelamiento del 28,62% al 66,75%, cerrando así la brecha más crítica del ciclo de vida.

A la luz de los resultados, se concluye que el plan de gestión integral propuesto constituye una respuesta válida y pertinente a las necesidades del sector. El diagnóstico evidenció brechas cuantificables, y el plan fue diseñado para atender sus causas raíz. La validación con expertos proyecta que, de adoptarse, el plan podría elevar la cobertura de buenas prácticas en 31,3 puntos porcentuales, lo que sugiere un alto potencial de impacto.

No obstante, esta conclusión se circunscribe al ámbito de la pertinencia y solidez conceptual del modelo. La confirmación de su efectividad en términos de reducción de plazos, control de costos y mejora del desempeño operativo requerirá de estudios aplicados posteriores, tal como se plantea en la sección de trabajo futuro. Por lo tanto, se concluye que el plan ofrece un marco de gestión robusto y adaptado, cuya implementación práctica constituye el siguiente paso lógico para validar empíricamente su contribución a la transición energética en Colombia

Trabajo futuro

Los resultados y limitaciones de esta investigación permiten identificar líneas de trabajo futuro para ampliar y consolidar la propuesta desarrollada:

- Una línea de investigación consistiría en la aplicación piloto del plan en uno o varios proyectos solares en etapas de desarrollo o construcción. Un estudio de caso de carácter longitudinal permitiría cuantificar su impacto real en la reducción de plazos, el control de costos, la eficacia de la gestión de riesgos y la mejora del desempeño operativo, proporcionando así una validación empírica de la hipótesis de trabajo.
- A partir del diagnóstico de las capacidades existentes, se podría investigar y diseñar un modelo de madurez que permita a las empresas desarrolladoras autoevaluar su nivel de competencia en la gestión de proyectos solares y trazar una ruta de mejora continua adaptada a sus necesidades específicas.

Referencias

- Adegboyega, A., Ani, E., Oladunni, S., & Pramanik, A. (2024). Project management tools in renewable energy integration: A review of U.S. perspectives. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(7), 2364-2378.
<https://doi.org/10.51594/estj.v5i7.1359>
- Albrecht, J. (2018). Comprehensive Geographic Information Systems. En *GIS Project Management* (pág. capítulo 1.31).
- Al-Marri, R., Abdalla, G., & Mahdi, E. (2025). Project management maturity in project-based organizations: frameworks, drivers, and the role of sustainability. *Future Business Journal*, 11(245). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s43093-025-00670-z>
- Álvarez, J., Camacho, Y., Mejía, A., & Otalora, O. (2021). *Análisis de riesgos en proyectos fase 3 de energías renovables paneles solares, en Colombia, a partir de la guía del project management institute – PMI–*. Universidad EAN.
- APM. (2015). *Planning, scheduling, monitoring and control: the practical project management of time, cost and risk*. .
- Aston, B. (03 de 11 de 2023). *Project Resource Management Plan Ultimate Guide: Definition & Template*. Obtenido de The Digital Project Manager:
<https://thedigitalprojectmanager.com/projects/managing-schedules/project-resource-management-plan/>
- BloombergNEF. (30 de Enero de 2025). *Global energy transition investment exceeded \$2 trillion last year, report shows*. Obtenido de Reuters:
<https://www.reuters.com/business/energy/global-energy-transition-investment-exceeded-2-trln-last-year-report-shows-2025-01-30/>

- Cabrales, R., & Osorio, R. (2022). *Propuesta para la gestión de proyectos de generación de energía eléctrica, a partir de energía solar fotovoltaica en la ciudad de Medellín-Colombia aplicando los lineamientos del PMBOK*. Universidad Santo Tomás.
- Caceres, D., Navarrete, G., & Peñuela, J. (2024). *Desarrollo de una guía metodológica para el análisis de la gestión de riesgos, la evaluación integral y el cumplimiento de objetivos en proyectos de energía solar fotovoltaica en Colombia*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- CREG. (2021). *Por la cual se definen las disposiciones y procedimientos para la asignación de capacidad de transporte en el Sistema Interconectado Nacional*. Ministerio de Minas y Energía.
- Curry, C. (21 de 09 de 2022). *Identifying Project Stakeholders in Project Management*. Obtenido de RCM Learning Solutions: https://rmcls.com/learn/blog/identifying-project-stakeholders-in-project-management/?srsltid=AfmBOoohajDynGlix_4aguKWT9SMzU6smgsAtGCSH2kDz5ZVMJYpENlx
- Curtis, T., Buchanan, H., Smith, L., & Heath, G. (2021). *A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations*. National Renewable Energy Laboratory (NREL) .
- Demirkesen, S., & Ozorhon, B. (2017). Impact of integration management on construction Project management performance. *International Journal of Project Management*, 35, 1639-1654.
- Duarte, D., & Guerrero, R. (2024). Métodos y técnicas en investigación cualitativa: una revisión integral en ciencias sociales. *Revista Sociedad Científica de Paraguay*, 29(2), 90 - 102. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.32480/rscp.2024.29.2.90102>

- European Commission. (2023). *Technical support for RES policy development and implementation – simplification of permission and administrative procedures for RES installations (RES Simplify) : final report.*
- Flick, U. (2018). *An Introduction to Qualitative Research (6th ed.)*. SAGE Publications.
- Gatzert, N., & Kosub, T. (2016). Risks and risk management of renewable energy projects: The case of onshore and offshore wind parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.103>
- Gómez-Navarro, T., & Ribó-Pérez, D. (2018). Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90*, 131 - 141.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>
- Heidari, M., & Heravi, G. (2024). Development of flexible supportive policy with real options for renewable energy projects: Case of photovoltaic systems. *Renewable Energy, 225*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120326>
- Heineke, F., Janecke, N., Klärner, H., Kühn, F., Tai, H., & Winter, R. (2023). *Renewable energy development in a net-zero world*. Obtenido de McKinsey & Company:
<https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/renewable-energy-development-in-a-net-zero-world>
- Hernández-López, D., Vega-De-Lille, M., Sacramento-Rivero, J., Ponce-Caballero, C., El-Mekaoui, A., & Navarro-Pineda, F. (2024). Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy. *Renewable Energy Focus, 51*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100649>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.

- Hitzeroth, M., & Megerle, A. (2013). Renewable Energy Projects: Acceptance Risks and Their Management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 576 - 584. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.022>
- IEA. (2024). *World Energy Outlook 2024*. International Energy Agency.
- International Finance Corporation (IFC). (2015). *Utility-scale solar photovoltaic power plants. A project developer's guide*. World bank group.
- International Project Management Association (IPMA). (2023). *Individual Competence Baseline for Project, Programme and Portfolio Management (ICB® Version 4.1)*. IPMA.
- IRENA. (2016). *IRENA Project Navigator - Technical Concept Guidelines for Utility-Scale Solar PV*.
- IRENA. (2025). *Renewable Capacity Statistics 2025*. International Renewable Energy Agency (IRENA).
- IRENA; IEA PVPS. (2016). *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- ISO. (2021). *ISO 21502:2021 - Project, programme and portfolio management - Guidance on project management*.
- ITRPV. (2024). *ITRPV Roadmap*. International Technology Roadmap for Photovoltaics.
- Jaramillo, J., & Solano, J. (2019). *Análisis de riesgos en proyectos de generación de energía en Colombia*. Universidad EAFIT.
- Kozhakhmetova, A., & Anarkhan, A. (2024). Green Energy Project Management: Applying Industry-Specific Risk Assessment Models. *Eurasian Journal of Economic and Business Studies*, 68(2). <https://doi.org/10.47703/ejeb.v68i2.406>
- KPMG. (2023). *Cambiando el rumbo del impulso a las energías renovables*. KPMG International.

- Lee, A. H., Kang, H.-Y., & Huang, T.-T. (2017). Project management model for constructing a renewable energy plant. *Procedia Engineering*, 174.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.186>
- Lokey, E. (2009). *Renewable Energy Project Development under the Clean Development Mechanism: A Guide for Latin America*. Taylor & Francis.
- Martínez, R. (2020). *Análisis de viabilidad de implementación de proyectos de energías renovables*. Universidad de La Salle.
- Mehos, M., Price, H., Cable, R., Kearney, D., Kelly, B., Kolb, G., & Morse, F. (2020). *Concentrating Solar Power Best Practices Study*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Narvaez, G., Giraldo, L. F., Bressan, M., & Pantoja, A. (2022). The impact of climate change on photovoltaic power potential in Southwestern Colombia. *Heliyon*, 8.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e111122>
- Note, M. (2016). Planning and Scheduling. En *Project Management for Information Professionals (capítulo 4)*. ChandoS Publishing.
- Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Bogotá. (2024). *Energía renovable en Colombia: Oportunidades y desafíos para los proyectos fotovoltaicos*. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Bogotá.
- Pacheco, G., Roa, F., Sarabia, Z., Sossa, M., & Vizcaino, C. (2021). *Diagnóstico de la efectividad de los proyectos en energía renovable en Colombia*. Universidad EAN.
- PeopleCert. (2023). *PRINCE2® 7: Managing Successful Projects (7th ed.)*. PeopleCert International.
- Pingulkar, C., Kshirsagar, R., Sengar, H., Kumar, L., Singh, S., & Poel, P. (2024). Implementing Lean Principles in Solar Project Management. *ICONIC RESEARCH AND ENGINEERING JOURNALS*, 8(3).

- Piwowar-Sulej, K., Sołtysik, M., Jarosz, S., & Pukała, R. (2023). The Linkage between Renewable Energy and Project Management: What Do We Already Know, and What Are the Future Directions of Research? *Energies*, 16(4609).
[https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16124609](https://doi.org/10.3390/en16124609)
- PMI. (2018). *The Standard for ORGANIZATIONAL PROJECT MANAGEMENT (OPM)*. Project Management Institute.
- PMI. (2019). *Practice Standard for Work Breakdown Structures - Third Edition*. Pennsylvania: Newton Square.
- PMI. (2020). *Ahead of the Curve: Forging a Future-Focused Culture. Pulse of the Profession*. Obtenido de <https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pmi-pulse-2020-final.pdf>
- PMI. (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Newtown Square, PA.
- Prasetyo, A., Gautama, I., Saroso, H., & Alamsjah, F. (2025). How do data, project management maturity, and PMO support shape resilient oil and gas projects? . *Journal of Project Management*, 10, 493-510.
<https://doi.org/10.5267/j.jpm.2025.4.004>
- PV-Tech. (23 de Junio de 2023). *Isagen y Atlas Renewable Energy anuncian hasta 1GWp de proyectos solares en Colombia*. Obtenido de <https://www.pv-tech.org/isagen-and-atlas-renewable-energy-sign-mou-for-1gwp-of-solar-projects-in-colombia/>
- PWC. (2017). *Utility scale solar PV projects*. Price Waterhouse Coopers.
- Rabinowitz, B. (s.f.). *Identifying and Analyzing Stakeholders and Their Interests*. Obtenido de The Community Tool Box: <https://ctb.ku.edu/en/table-of-contents/participation/encouraging-involvement/identify-stakeholders/main>

- REN21. (2024). *RENEWABLES 2024 GLOBAL STATUS REPORT*. REN21 Secretariat.
- República, L. (21 de Abril de 2025). *Celsia compró portafolio de proyectos de energía solar y eólico y se acerca a su meta*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/celsia-compra-portafolio-de-proyectos-de-energia-solar-y-eolico-y-se-acerca-a-su-meta-4115051>
- Revinova, S., & Lazanyuk, I. (2025). Adopting internet project management to achieve sustainable development goals in the context of energy transition. *Unconventional Resources*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100158>
- Ruíz, A., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Corral, F., Oberlander, N., & Oei, P.-Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266 - 1279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Shah, F., Bhatti, O., & Ahmed, S. (2023). Project Management Practices in Construction Projects and Their Roles in Achieving Sustainability—A Comprehensive Review. *Engineering proceedings*, 2, 44. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/>
- Sirwan, A., Ribwar, M., Abdulqadir, N., Radhwan, I., Araz, A., Barzan, M., & Renas, M. (2025). Using thematic analysis in qualitative research. *Nursing & Health Sciences*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2025.100198>
- SolarPower Europe. (2024). *Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028*. SolarPower Europe.
- Soto, D. (2020). *Limitaciones en infraestructura de transporte en el desarrollo de proyectos donde se involucren Fuentes de Energía Renovable no Convencional – FERNC*. Universidad de los Andes.
- Springer, R. (2013). A Framework for Project Development in the Renewable Energy Sector. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*.

SUNPOWER INVEST S.L. (2020). *Plan de desmantelamiento para planta solar fotovoltaica*.

The Solar Foundation. (2020). Large-scale solar development: a playbook for southwest Virginia. SolSmart program. U.S. Department of Energy Solar Energy Technologies Office.

Torres, J. (2025). *Análisis de lecciones aprendidas a partir de expertos colombianos en la gestión de proyectos de infraestructura tecnológica*. Universidad EAFIT.

UPME. (2022). *Guía metodológica para la viabilización de proyectos de energía para el fondo para plan todos somos pazcífico – FTSP*. Unidad de Planeación Minero Energética.

UPME. (12 de Octubre de 2023). *Comunicado 09 - Solicitudes de conexión*. Obtenido de UPME:
https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_UPME_09_Solicitudes_Conexion_12-10-23.pdf

UPME. (11 de Junio de 2024). *Comunicado 24: Plan de generación de energía de la UPME proyecta 53% de participación de fuentes renovables a 2037*. Obtenido de UPME:
https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_24_UPME_Generacion_11-06-2024.pdf

UPME. (2024a). *Plan indicativo de expansión de la generación: Actualización 2023–2037*. Ministerio de Minas y Energía.

UPME. (2024b). *Informe de avance de proyectos de generación a diciembre de 2024*. Unidad de Planeación Minero Energética.

Vega Araújo, J., & Muñoz Cabré, M. (2023). *Solar and wind power in Colombia: 2022 policy overview*. Stockholm Environment Institute.

World Bank Group. (2024a). *A Blueprint for Scaling Up Clean Energy in Emerging Markets*. World Bank.

World Bank Group. (2024b). *Scaling up to phase down: A path to energy transition in developing countries*. World Bank.

Xie, Z., Liu, A., Barreiros, L., Li, C., Lin, T., & Hong, J. (2025). Investment analysis and risk management of renewable energy greenfield in Brazil. *Discover Sustainability*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s43621-025-02115-7>

XM. (2024). *Informe Q1–Q2 2024: proyectos de generación en el sistema interconectado nacional*. XM.

Yudha, H. M., Dewi, T., Risma, P., & Oktarina, Y. (2018). Life Cycle Analysis for the Feasibility of Photovoltaic System Application in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Chicago: Purpose-LED publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/124/1/012005>

A. Anexo. Metodologías de referencia para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala

A.1 Introducción

El desarrollo exitoso de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala requiere de la aplicación sistemática de metodologías de gestión que aborden su complejo ciclo de vida. Este anexo tiene como objetivo compilar y presentar de manera estructurada los marcos metodológicos internacionales más relevantes, los cuales sirven como base de referencia para el diagnóstico del contexto colombiano y para el diseño del plan de gestión integral propuesto en este trabajo. La síntesis de estos enfoques permite identificar buenas prácticas, herramientas estandarizadas y procesos críticos que pueden ser adaptados a las particularidades del sector energético nacional (International Finance Corporation (IFC), 2015; IRENA, 2016; Commission et al., 2023).

A.2 Metodologías internacionales de gestión del ciclo de vida

A.2.1 Metodología del Banco Mundial (International Finance Corporation - IFC)

La International Finance Corporation (IFC), como miembro del Grupo del Banco Mundial, ha desarrollado una guía para desarrolladores de proyectos de energía renovable. Su metodología se estructura en fases secuenciales que garantizan una evaluación integral y una ejecución controlada, desde la concepción hasta la operación (International Finance Corporation (IFC), 2015):

- Preparación y planificación del proyecto: comprende la evaluación exhaustiva del potencial del recurso solar, la identificación de sitios adecuados y la realización de estudios de viabilidad técnica, económica, ambiental y social.
- Diseño e ingeniería de proyectos: incluye el diseño del sistema fotovoltaico en función de los requisitos específicos, la selección de tecnologías y componentes apropiados, y la garantía del cumplimiento de normas y regulaciones técnicas.

- **Financiamiento e inversión:** abarca el desarrollo de un modelo financiero, la identificación de fuentes de financiamiento y la negociación de acuerdos de compra de energía (PPA).
- **Permisos y cumplimiento normativo:** consiste en la obtención de los permisos y aprobaciones necesarias de las autoridades pertinentes y el aseguramiento del cumplimiento de las regulaciones locales y estándares internacionales.
- **Construcción e implementación:** requiere el desarrollo de un plan y cronograma de construcción detallado, la implementación de medidas de control de calidad y la supervisión de las actividades de construcción.
- **Operación y mantenimiento:** Se establece un plan de operación y mantenimiento (O&M) para garantizar el rendimiento y la confiabilidad a largo plazo, realizando inspecciones periódicas, actividades de mantenimiento y monitoreo del desempeño.
- **Monitoreo y evaluación:** propone la implementación de un marco de seguimiento y evaluación para llevar el progreso, el desempeño y el impacto del proyecto a lo largo del tiempo, utilizando los hallazgos para la optimización de esfuerzos futuros.

A.2.2 Metodología de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)

IRENA, a través de su "Project Navigator", proporciona un marco integral que facilita la planificación, ejecución y financiamiento de proyectos solares, fundamentado en un enfoque de ciclo de vida (IRENA, 2016):

- **Identificación y evaluación de proyectos:** evalúa el potencial solar mediante análisis de radiación solar y la viabilidad técnica y económica del proyecto.
- **Desarrollo y diseño del proyecto:** incluye el diseño del sistema fotovoltaico, la selección de la tecnología adecuada, el dimensionamiento del sistema y la obtención de permisos y aprobaciones.
- **Financiación del proyecto:** se identifican fuentes de financiamiento, se estructura un paquete financiero atractivo y se cierran acuerdos de financiamiento.
- **Implementación y construcción del proyecto:** abarca la selección de contratistas cualificados, la supervisión de la construcción para asegurar el

cumplimiento de especificaciones y cronogramas, y la realización de pruebas y puesta en marcha.

- Operación y mantenimiento del proyecto: consiste en operar el sistema eficientemente, realizar mantenimiento preventivo y correctivo, y monitorear el rendimiento para identificar problemas y tomar medidas correctivas.

A.2.3 Metodología de la Comisión Europea para energía renovable

La Unión Europea proporciona un conjunto de directrices y enfoques que abarcan una amplia gama de aspectos, desde la planificación y el diseño hasta la financiación y la operación de proyectos renovables en los países miembros (European Commission, 2023):

- Planificación y evaluación de recursos: comienza con la identificación y evaluación de recursos disponibles, incluido el recurso solar, mediante el análisis de datos meteorológicos y de irradiación solar.
- Marco regulatorio y político: proporciona directrices y regulaciones relacionadas con el desarrollo de proyectos, incluyendo políticas de apoyo, incentivos financieros y normativas de conexión a la red.
- Evaluación de viabilidad técnica y económica: incluye pautas para evaluar la viabilidad técnica y económica mediante estudios de factibilidad, análisis de costos y beneficios, y evaluación de riesgos.
- Diseño y desarrollo del proyecto: ofrece directrices para el diseño y desarrollo, incluyendo la selección de tecnología, el dimensionamiento del sistema, la planificación del sitio y la obtención de permisos.
- Financiación y asistencia financiera: ofrece apoyo financiero y asistencia a través de programas de financiación, subsidios, préstamos preferenciales y garantías.
- Operación y mantenimiento: proporciona pautas para la operación y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida, lo que implica la implementación de planes de mantenimiento preventivo y correctivo y el monitoreo del rendimiento del sistema.

A.2.4 Otras directrices y buenas prácticas

Adicionalmente, organismos con alta capacidad técnica y experiencia han presentado directrices valiosas a través de artículos y buenas prácticas:

- Instituto alemán de energía solar (ISE): sus metodologías se centran en la eficiencia energética, la integración en la red eléctrica y la maximización del rendimiento de los sistemas.
- Centro de desarrollo de energías renovables (CENER) en España: sus metodologías se centran en aspectos como la evaluación del recurso solar, el dimensionamiento de sistemas y la evaluación de impacto ambiental.
- Centro de energías renovables (CER) en Chile: sus metodologías abarcan aspectos como la evaluación del recurso solar, el diseño de sistemas, la evaluación de impacto ambiental y la integración en la red eléctrica.

A.3 Conclusión del anexo

La revisión de estas metodologías internacionales evidencia un consenso sobre la necesidad de un enfoque estructurado y de ciclo de vida completo para la gestión de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala. Principios como la evaluación integral de viabilidad, la gestión proactiva de riesgos, la estandarización de procesos de O&M y la consideración del desmantelamiento son comunes a todos los enfoques. Esta base teórica y práctica sustenta la identificación de las brechas en el contexto colombiano y justifica el desarrollo de un plan de gestión integral que, tomando lo mejor de estos marcos, se adapte a la realidad regulatoria, técnica y financiera del país.

B. Anexo. Plan para la gestión de proyectos solares fotovoltaicos

B.1 Introducción

Este anexo desarrolla el Plan para la dirección del proyecto que operativiza la "Estructura del plan integral de gestión de proyectos solares fotovoltaicos" presentada en la Figura 3 de esta investigación. El plan se constituye como el documento que describe cómo se gestionará, ejecutará y controlará el proyecto y que busca garantizar que no haya sorpresas durante la ejecución sobre cómo se gestiona el proyecto o se toman las decisiones.

B.2 Fundamentos de gobernanza del proyecto

B.2.1 Integración del proyecto

La gestión de la integración se constituye como uno de los elementos más importantes de la gestión de proyectos, que abarca todos los aspectos de un proyecto (Demirkesen & Ozorhon, 2017). Esta función garantiza la coordinación entre los cinco subprocesos del plan integral y se materializa inicialmente mediante el acta de constitución del proyecto, documento que sirve como referencia de autoridad para el futuro del proyecto (Albrecht, 2018).

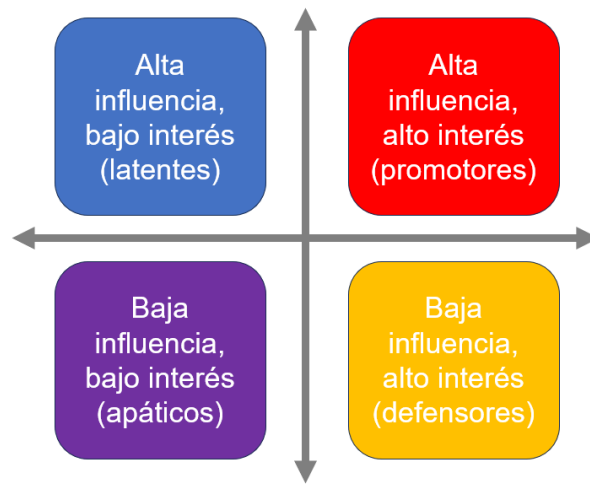
B.2.2 Gestión de interesados

El análisis y gestión de partes interesadas resulta crítico para el éxito del proyecto. La metodología propuesta por Curry (2022) establece cinco pasos fundamentales: (1) identificación temprana de todos los interesados, (2) determinación de requisitos y expectativas, (3) evaluación del nivel de interés, (4) comprensión del nivel de influencia y autoridad, y (5) planificación de la comunicación y participación.

Para el análisis, se emplea la matriz de influencia e interés (Rabinowitz, s.f.), que clasifica a los interesados en cuatro categorías:

Figura 6

Matriz de influencia e interés



Nota. Adaptado de “Identifying and Analyzing Stakeholders and Their Interests”, por (Rabinowitz, s.f.).

Como se puede apreciar en la Figura 6, la influencia de menor a mayor sobre el esfuerzo corre a lo largo de una línea desde la parte inferior hasta la parte superior de la cuadrícula, y el interés de bajo a alto en el esfuerzo corre a lo largo de una línea de izquierda a derecha. Tanto la influencia como el interés pueden ser positivos o negativos, dependiendo de las perspectivas de las partes interesadas en cuestión. Las líneas que los describen son continuas, lo que significa que las personas pueden tener cualquier grado de interés, desde ninguno hasta el más alto posible, incluido cualquiera de los puntos intermedios.

Igualmente, se pueden definir las mismas características de las partes interesadas en términos de cómo se relacionan con el esfuerzo:

- Promotores: Alto interés y alta influencia (ANLA, UPME, patrocinador)
- Defensores: Alto interés y baja influencia (comunidades locales, equipo técnico)
- Latentes: Bajo interés y alta influencia (alta dirección no involucrada)
- Apáticos: Bajo interés y baja influencia.

B.3 Componentes esenciales del plan de gestión

B.3.1 Gestión del alcance

La gestión del alcance involucra todos los procesos requeridos para asegurar que el proyecto incluya todo el trabajo requerido para culminar el proyecto de forma exitosa (PMI, 2021). El instrumento central lo constituye la Estructura de Desglose del Trabajo (EDT), que descompone el alcance del proyecto en paquetes de trabajo manejables, jerárquicos y definibles (PMI, 2019).

La EDT orientada a entregables proporciona beneficios fundamentales:

- Mejor comunicación con patrocinadores, partes interesadas y miembros del equipo.
- Estimación más precisa de tareas, riesgos, cronogramas y costos.
- Mayor confianza en que el 100% del trabajo esté identificado e incluido.
- Base para los procesos de control dentro del proyecto.

B.3.2 Gestión del cronograma

El cronograma del proyecto representa la herramienta que comunica qué trabajo se debe realizar, qué recursos de la organización realizarán el trabajo y los plazos en los que se debe realizar ese trabajo (Note, 2016). La gestión del cronograma establece los lineamientos para:

- Desarrollo de la línea base del cronograma inicial.
- Mantenimiento del cronograma actual que refleje cambios aprobados.
- Aplicación de métodos de control como el método de ruta crítica.
- Utilización de la gestión del valor ganado para monitoreo del desempeño.

B.3.3 Gestión de costos

La gestión de costos comprende los procesos necesarios para garantizar que el proyecto se complete dentro del presupuesto aprobado (APM, 2015), estructurándose en tres elementos fundamentales:

1. Estimación de costos: proceso iterativo que emplea técnicas análogas, paramétricas y de tres puntos.
2. Presupuestación de costos: agregación de costos estimados para establecer línea base.
3. Control de costos: proceso de recopilar los costos reales y cotejarlos, para comparar con los presupuestos del proyecto.

B.3.4 Gestión de riesgos

El riesgo del proyecto se define como un evento o condición incierta que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo en al menos un objetivo del proyecto (PMI, 2021). El proceso de gestión incluye:

- Identificación de riesgos: se examina el alcance mediante técnicas como lluvia de ideas y listas de verificación.
- Análisis cualitativo: evaluación de probabilidad e impacto de riesgos identificados.
- Planificación de respuestas: desarrollo de estrategias de evitación, mitigación, transferencia o aceptación.

B.3.5 Gestión de la calidad

El enfoque de gestión de calidad abarca planificación de la calidad, garantía de la calidad y control de la calidad (PMI, 2021). La gestión de calidad documenta:

- Planificación: Identificación de estándares relevantes y definición de métricas y criterios de aceptación.
- Aseguramiento: Actividades que brindan confianza en el cumplimiento de los estándares de calidad.
- Control: Acciones de seguimiento y control para verificar el cumplimiento de estándares.

B.3.6 Gestión de recursos

El plan de recursos constituye una estrategia sobre cómo se asignarán, programarán y utilizarán los recursos durante el ciclo de vida del proyecto (Aston, 2023). Sus funciones críticas incluyen:

- Hacer que el plan sea accesible para todos los involucrados.
- Mantener información actualizada sobre flujos de trabajo y recursos.
- Proporcionar información precisa para la toma de decisiones.

B.4 Implementación y control del ciclo de vida

La ejecución del proyecto debe realizarse de acuerdo con las estrategias y planes establecidos, actualizando el documento para reflejar cualquier cambio aprobado durante la ejecución del proyecto. Al final del proyecto, se deben realizar actualizaciones finales y utilizar el cronograma, presupuesto y gastos finales, criterios de éxito, beneficios, alcance, etc. para evaluar el éxito del proyecto durante su cierre.

B.5 Conclusión

Este plan para la gestión de proyectos proporciona el marco metodológico completo para la implementación de la estructura integral presentada en la monografía principal. Cada componente aquí desarrollado sustenta operativamente los cinco subprocesos del modelo propuesto, estableciendo los fundamentos de gobernanza, planificación y control necesarios para favorecer la ejecución adecuada de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia, desde su concepción hasta su desmantelamiento.

De forma adjunta al presente documento se entregan los 6 apéndices y el manual del plan de gestión, que corresponden con las plantillas base para el plan de gestión de proyectos de la Figura 3.

C. Anexo. Sistema de indicadores (KPIs) para la gestión del ciclo de vida de proyectos solares fotovoltaicos

El presente anexo establece el sistema de indicadores de desempeño (KPIs) para la gestión integral de proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia. Los KPIs propuestos se fundamentan en los documentos estudiados para la presente monografía.

C.1 Desarrollo y planificación

C.1.1 Porcentaje de completitud de estudios de factibilidad

Mide el grado de avance en la elaboración y aprobación de los estudios técnicos, económicos y ambientales requeridos para la viabilidad del proyecto.

Permite monitorear el progreso en la fase crítica de estudios previos, identificando posibles retrasos que impactarían el cronograma general. Un avance insuficiente en esta fase genera riesgos en la toma de decisiones de inversión.

Fórmula:

$$\%E.F. = \frac{\text{Número de estudios completados y aprobados}}{\text{Total de estudios requeridos}} \times 100$$

Meta: >95% al final de la fase

C.1.2 Eficiencia en obtención de licencias y permisos

Evalúa el cumplimiento de los tiempos planificados para la obtención de autorizaciones ambientales, de uso de suelo y conexión eléctrica.

Las demoras en permisos son una de las principales causas de retraso en proyectos solares en Colombia. Este indicador permite gestionar proactivamente los trámites ante ANLA, UPME, etc.

$$\%O.L. = \frac{\text{Días reales de trámite}}{\text{Días planificados en cronograma}} \times 100$$

Meta: <110%

C.1.3. Efectividad en identificación temprana de riesgos

Cuantifica la capacidad del equipo para identificar y planificar respuestas ante riesgos potenciales durante la fase de desarrollo.

La gestión temprana de riesgos reduce significativamente la probabilidad de sobrecostos y retrasos durante la ejecución. Especialmente crítico para riesgos regulatorios y sociales en el contexto colombiano.

Fórmula:

$$\%I.T.R. = \frac{\text{Riesgos críticos identificados y con plan de mitigación}}{\text{Total de riesgos críticos identificados}} \times 100$$

Meta: >90%

C.2 Diseño e ingeniería

C.2.1 Avance de documentación de ingeniería

Mide el progreso en la elaboración de planos, especificaciones técnicas y documentos de ingeniería detallada.

Retrasos en ingeniería impactan directamente la adquisición de materiales y el inicio de construcción. Este KPI asegura que la documentación técnica esté disponible según cronograma.

Fórmula:

$$\%A.D.I. = \frac{\text{entregables ejecutados en ingeniería}}{\text{entregables de ingeniería planificados}} \times 100$$

Meta: 100% en fechas de compromiso.

C.3 Construcción y ejecución

C.3.1 Índice de desempeño del cronograma

Evalúa la eficiencia en el cumplimiento de los plazos establecidos mediante la metodología de valor ganado.

Proporciona una medida objetiva del avance físico real vs. planificado, permitiendo identificar desviaciones tempranas y tomar acciones correctivas.

Fórmula:

$$\text{I.D.CR.} = \frac{\text{Valor ganado (EV)}}{\text{Valor planificado (PV)}}$$

Meta: 0.95 - 1.05

C.3.2 Índice de desempeño de costos

Mide la eficiencia en la utilización del presupuesto mediante análisis de valor ganado.

Detecta variaciones presupuestales de manera temprana, facilitando la gestión financiera y el control de sobrecostos, críticos en proyectos de infraestructura energética.

Fórmula: Valor ganado (EV) / Costo real (AC)

$$\text{I.D.CT.} = \frac{\text{Valor ganado (EV)}}{\text{Costo real (AC)}}$$

Meta: >0.95

C.4 Operación y mantenimiento

C.4.1 Performance ratio (PR) de la planta

Evalúa la eficiencia global del sistema fotovoltaico comparando la energía real generada vs. la energía teóricamente posible.

Es el indicador técnico más importante para medir el desempeño operativo. Un PR bajo indica problemas en equipos, suciedad o deficiencias en el diseño.

Fórmula:

$$\%PR = \frac{\text{Energía real generada AC}}{\text{Energía teórica AC esperada}} \times 100$$

Meta: >80% (dependiendo de tecnología y ubicación).

C.4.2 Disponibilidad técnica del sistema

Mide el porcentaje de tiempo que la planta está operativa y capaz de generar energía.

Impacta directamente los ingresos por venta de energía. La disponibilidad está ligada a la efectividad del mantenimiento y la confiabilidad de los equipos.

Fórmula:

$$\%Disp = \frac{\text{Horas operativas} - \text{Horas de parada no planificada}}{\text{Horas totales del período}} \times 100$$

Meta: >98%

C.4.3 Costo nivelado de energía (LCOE)

Representa el costo promedio por kWh generado considerando todos los costos del ciclo de vida.

Es la métrica financiera clave para evaluar la competitividad del proyecto frente a otras fuentes de generación y para la toma de decisiones de reinversión.

Fórmula:

$$LCOE = \frac{\text{Costos totales de inversión} + \text{O\&M} + \text{desmantelamiento}}{\text{Energía total generada en vida útil}}$$

Meta: Según proyección del modelo financiero

C.5 Cierre y desmantelamiento

C.5.1 Tasa de valorización de materiales en desmantelamiento

Mide el porcentaje de materiales y equipos que son reciclados, reutilizados o valorizados al final de la vida útil.

Promueve la economía circular y reduce impactos ambientales.

Fórmula:

$$\%Desm = \frac{\text{Peso de materiales valorizados}}{\text{Peso total de materiales desmantelados}} \times 100$$

Meta: >90%

C.5.2 Cumplimiento del plan de cierre

Evalúa el grado de ejecución de las actividades planificadas para el cierre técnico, administrativo y contractual del proyecto.

Un cierre ordenado garantiza la liberación de garantías, el pago de contratistas y la documentación adecuada de lecciones aprendidas.

Fórmula:

$$\%P.C. = \frac{\text{Actividades de cierre completadas según plan}}{\text{Total de actividades de cierre}} \times 100$$

Meta: >95%

C.5.3 Desviación de costos de desmantelamiento

Controla la ejecución del presupuesto asignado para las actividades de desinstalación y restauración del sitio.

Valida la precisión de las estimaciones iniciales de costos de fin de vida y proporciona datos para futuros proyectos.

Fórmula:

$$\%C.Desm. = \frac{\text{Costo real de desmantelamiento} - \text{Costo presupuestado}}{\text{Costo presupuestado}} \times 100$$

Meta: $\pm 10\%$

D. Anexo. Instrumento de validación: cuestionario para entrevistas

D.1 Introducción

Este anexo presenta el instrumento aplicado para la validación complementaria con profesionales del sector solar fotovoltaico a gran escala en Colombia (capacidad > 1 MW conectados al SIN). El cuestionario se diseñó para (i) contrastar externamente las barreras y brechas identificadas en el diagnóstico documental (licenciamiento y permisos, interconexión y limitaciones de red, predominio del mantenimiento correctivo, y vacíos de cierre/desmantelamiento) y (ii) estimar, bajo un supuesto explícito de implementación disciplinada, la cobertura de buenas prácticas “antes” y la cobertura alcanzable “después” de aplicar las herramientas del plan de gestión integral propuesto.

D.2 Instrucciones de diligenciamiento

Responda con base en su proyecto de referencia más representativo o en su experiencia promedio en proyectos similares. La información se usa con fines académicos y se reporta de forma agregada, preservando la confidencialidad de personas, empresas y proyectos.

D.3 Cuestionario

D.3.1 Caracterización del participante

1. ¿Su trabajo actual se desarrolla en Colombia y dentro de proyectos solares FV a gran escala (>1 MW) conectados al SIN?
 - a) Sí.
 - b) No.

2. Años de experiencia directa en proyectos solares FV (desarrollo, ejecución, O&M, regulación, etc.).
 - a) Menor a 2 años.
 - b) 2 – 5 años.
 - c) 6 – 10 años.

- d) Mayor a 10 años.
3. Rol principal (seleccione la más cercana).
- a) Desarrollador/patrocinador.
 - b) Empresa de construcción/EPC.
 - c) Operador de red.
 - d) Financiadador/Inversionista.
 - e) Consultor técnico.
4. Fases del ciclo de vida donde participa (puede marcar varias).
- a) Desarrollo.
 - b) Diseño e Ingeniería.
 - c) Construcción.
 - d) Operación y Mantenimiento.
 - e) Desmantelamiento.

D.3.2 Desarrollo del proyecto y licenciamiento ambiental y permisos

Para las siguientes preguntas indique su percepción respecto a lo consultado en cada pregunta conforme con lo siguiente:

1 = Muy bajo / Nunca / Nulo

2 = Bajo / Rara vez

3 = Medio / A veces

4 = Alto / Frecuente

5 = Muy alto / Muy frecuente

En proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Colombia (capacidad > 1 MW conectados al SIN). Piense en su proyecto de referencia más representativo o en la experiencia promedio de sus proyectos similares.

5. ¿Con qué frecuencia ha observado retrasos del cronograma por licenciamiento ambiental y permisos transversales (arqueología, consulta previa, uso del suelo, etc.) durante la etapa de desarrollo?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

6. ¿Qué nivel de impacto tiene la tramitología multisectorial y/o falta de claridad regulatoria sobre el cronograma del proyecto?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

7. ¿Qué nivel de impacto tienen los hitos de conexión (p. ej., tipo curva S) y/o garantías en costo y riesgo financiero?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

8. ¿Qué nivel de impacto tienen limitaciones de red/subestaciones (capacidad, refuerzos) en retrasos e inversiones adicionales?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez

- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

9. ¿Con qué frecuencia ha observado sobrecostos/retrasos por débil integración planificación técnica–gestión de riesgos?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

10. En O&M, ¿qué tan frecuente es que predomine el mantenimiento correctivo (vs preventivo/predictivo)?

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

11. ¿Qué nivel de riesgo percibe por ausencia/limitación de normativa de cierre/desmantelamiento?.

- a) 1 = Muy bajo / Nunca / Nulo
- b) 2 = Bajo / Rara vez
- c) 3 = Medio / A veces
- d) 4 = Alto / Frecuente
- e) 5 = Muy alto / Muy frecuente

Describa un ejemplo donde una situación de las consultadas generó retraso/sobrecosto en alguno de sus proyectos e indique la fase en que ocurrió.

RTA//:

D.3.3 Rangos de tiempo/costo

12. Duración real de la fase de desarrollo (meses):

- a) ≤ 18 meses
- b) 19–36 meses
- c) 36 meses

13. Duración planificada vs real en la obtención de licencias/permisos.

- a) $\leq 100\%$ (Real \leq Plan)
- b) 101–110% (hasta +10%)
- c) 111–125% (+11% a +25%)
- d) $> 125\%$ (más de +25%)

14. Duración planificada vs real en la obtención de los acuerdos de Conexión/interconexión y asignación de capacidad.

- a) $\leq 100\%$ (Real \leq Plan)
- b) 101–110% (hasta +10%)
- c) 111–125% (+11% a +25%)
- d) $> 125\%$ (más de +25%)

15. Sobrecosto atribuible a retrasos por trámites y/o conexión (% CAPEX).

- a) $\leq 12\%$
- b) 13–15%
- c) $> 15\%$

16. Costo adicional aproximado en los proyectos debido a la necesidad de refuerzos de red (líneas/subestaciones).

- a) $< 0,8$ MUSD / 100 MW (equivalente)
- b) 0,8–1,5 MUSD / 100 MW (equivalente)
- c) 1,5 MUSD / 100 MW (equivalente)

17. En la etapa de O&M qué proporción de mantenimiento correctivo se lleva a cabo vs preventivo/predictivo en relación con el plan de mantenimiento.

- a) 0–25% correctivo
- b) 26–50% correctivo
- c) 51–75% correctivo
- d) 76–100% correctivo

D.3.4 Estado actual de la gestión de proyectos

Para las siguientes preguntas tenga en cuenta desde su punto de vista el grado de implementación o cobertura que la organización para la que trabaja o los proyectos en los que ha trabajado, tiene o ha tenido en consideración cada uno de los aspectos que se consultan.

Escala de cobertura de buenas prácticas (0–100%):

- 0–30%: Muy baja (ausencia de procesos documentados)
- 31–50%: Baja (procesos informales y no estandarizados)
- 51–70%: Media (implementación parcial de estándares)
- 71–90%: Alta (aplicación sistemática de la mayoría de buenas prácticas)
- 91–100%: Muy alta (alineación con altos estándares y mejora continua)

18. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene en su experiencia la práctica de contar y usar cronogramas unificados y líneas base realistas para permisos/licencias, es decir: cronograma formal, con hitos de permisos, y usado para seguimiento y control?

RTA//:

19. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de usar sistemáticamente una matriz de riesgos que incluya (según el diagnóstico) riesgos regulatorios, interconexión, financieros y sociales-ambientales, con acciones/planes asociados?

RTA//:

20. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de capturar y reutilizar lecciones aprendidas (banco o repositorio) para mejorar replicabilidad y preparación de proyectos?

RTA//:

21. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de adoptar metodologías formales de gestión (más allá de herramientas básicas), tal como tu diagnóstico menciona (PMBOK/ISO/IRENA Navigator)?

RTA//:

22. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de integrar la gestión de riesgos con la planificación y el control (por ejemplo, reflejar riesgos/contingencias en cronograma/costos y gestionarlos durante ejecución)?

RTA//:

23. En Operación y Mantenimiento, ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de contar y aplicar protocolos estandarizados de O&M ajustados al contexto (existencia documentada y uso sistemático)?

RTA//:

24. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de mantenimiento preventivo/predictivo (en lugar de predominio correctivo), tal como el diagnóstico describe como brecha?

RTA//:

25. ¿qué nivel de cobertura (0–100) tiene la práctica de planificar el cierre/desmantelamiento desde etapas tempranas, incluyendo alcance, costos fin de vida y gestión de residuos, considerando que el diagnóstico identifica vacíos y baja atención a esta fase?

RTA//:

Implementación del plan de gestión de proyectos

Desde su punto de vista indique el nivel de conveniencia que vería en implementar y mantener en los proyectos solares fotovoltaicos en Colombia las siguientes herramientas de gestión de proyectos.

26. ¿qué tan útil sería contar con un Acta de Constitución que deje definidos desde el inicio: objetivos, alcance, roles, interesados críticos (ANLA/CAR/comunidades), y un primer listado de riesgos regulatorios y requisitos de garantías?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

27. ¿qué tan útil sería estandarizar un estudio de prefactibilidad que incluya: (i) diagnóstico temprano de capacidad de red y posibles costos de refuerzo, (ii) ruta ambiental probable (ANLA vs CAR), y (iii) estimación de tiempos/costos de permisos transversales (arqueología, consulta previa, uso del suelo)?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

28. ¿qué tan útil sería trabajar con una EDT estándar que obligue a estructurar el proyecto incluyendo paquetes para permisos/licencias, interconexión y gestión social, evitando omisiones y retrabajos?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media

- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

29. ¿Qué tan útil sería usar un cronograma base que incluya reservas explícitas para contingencias regulatorias y de interconexión (en lugar de planear “sin holguras” y ajustar tarde)?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

30. ¿qué tan útil sería que la línea base de costos incluya desde el inicio una partida explícita (estimada) para refuerzos de red y contingencias asociadas a retrasos?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

31. ¿Qué tan útil sería implementar una matriz de riesgos estándar (regulatorios, interconexión, financieros, técnicos, sociales-ambientales) con respuestas definidas, y revisiones periódicas durante el ciclo de vida?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

32. ¿qué tan útil sería contar con protocolos estandarizados que incluyan: competencias/recursos, plan de calidad O&M, monitoreo y reportes, para reducir correctivos y mejorar disponibilidad/desempeño?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

33. ¿qué tan útil sería exigir un plan de cierre/desmantelamiento desde etapas tempranas (alcance, provisión de costos fin de vida, gestión de residuos), para reducir incertidumbre regulatoria/financiera futura?

- a) 1 = Utilidad nula.
- b) 2 = Baja.
- c) 3 = Media
- d) 4 = Alta
- e) 5 = Muy alta

Asumiendo que el plan se implementa con disciplina (responsables definidos, reuniones de control, documentación y seguimiento), estime la cobertura alcanzable.

34. ¿qué nivel de cobertura alcanzable (0–100) estima para la práctica de cronogramas unificados y líneas base realistas para permisos/licencias?

RTA//:

35. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para el uso sistemático de matriz de riesgos con planes de respuesta?

RTA//:

36. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para capturar y reutilizar lecciones aprendidas?

RTA//:

37. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para la adopción real de metodologías formales de gestión en construcción/ejecución?

RTA//:

38. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para la integración efectiva de riesgos con planificación y control (incluyendo contingencias)?

RTA//:

39. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para contar y aplicar protocolos estandarizados de O&M?

RTA//:

40. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para la práctica de mantenimiento preventivo/predictivo (reduciendo predominio correctivo)?

RTA//:

41. ¿qué cobertura alcanzable (0–100) estima para la práctica de planificar cierre/desmantelamiento desde temprano, con costos fin de vida y gestión de residuos?

RTA//:

E. Anexo. Perfiles de las personas entrevistadas

A continuación, se presenta una breve descripción de los perfiles profesionales de las personas que aportaron en la respuesta a las consultas realizadas durante las entrevistas.

- Jose Hernández Palma. Ingeniero civil con más de 15 años de experiencia laboral, de los cuales 10 han sido en proyectos de energías renovables siendo su enfoque los proyectos solares fotovoltaicos a gran escala principalmente en Colombia. Ha tenido experiencia trabajando como director de proyectos con empresas promotoras y dueñas de los proyectos tanto en la etapa de desarrollo como en la de construcción, también ha tenido experiencia desde el punto de vista del contratista EPC con proyectos en Colombia y países de centro américa. Actualmente se encuentra trabajando como especialista senior de proyectos en Ecopetrol.
- Diego Alejandro Burbano. Ingeniero electricista con más de 13 años de experiencia en el sector eléctrico en áreas de mantenimiento de redes de distribución, gestión de la medida y proyectos fotovoltaicos. En los últimos 8 años ha estado dirigiendo proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en la etapa de ejecución, desde la parte del inversionista o promotor del proyecto. Actualmente, se encuentra trabajando como gestor de proyectos en una compañía internacional de suministro de equipos eléctricos para proyectos fotovoltaicos en Estados Unidos (TMEIC).
- Michelle Barney Salguero. Ingeniera civil con más de 16 años de experiencia en la gestión de proyectos de infraestructura, principalmente el sector de petróleo y gas, y desde hace 9 años en el sector de las energías renovables mayormente proyectos solares fotovoltaicos. Ha sido líder de varios proyectos solares a gran escala que ha logrado llevar a su puesta en operación comercial de manera exitosa. Actualmente desempeña el rol de directora de operaciones de una empresa EPC de proyectos solares en Colombia.
- Christian Eduardo Quintana. Ingeniero electrónico con 14 años de experiencia profesional. Trabajó durante 5 años como ingeniero de soporte en telecomunicaciones y protecciones para proyectos de transmisión y distribución de energía eléctrica. Lleva 6 años trabajando como director de

proyectos fotovoltaicos a gran escala en diferentes partes de Colombia, principalmente en el rol del inversionista del proyecto.

- Guillermo Torres. Ingeniero electricista con más de 16 años de experiencia en diferentes roles del sector energético, desde labores de planeación y ejecución del mantenimiento de redes de transmisión y distribución, pasando por roles de análisis y gestión de riesgos, hasta la parte de gestión de proyectos de construcción. Durante los últimos 6 años ha trabajado en diferentes roles relacionados con proyectos solares fotovoltaicos en toda la cadena de valor de los proyectos, particularmente roles de diseño, desarrollo y ejecución de los proyectos, siempre desde el lado del dueño del proyecto.
- Andrés Felipe Hernández. Ingeniero electricista con 10 años de experiencia en el sector eléctrico. Ha trabajado principalmente en el área de desarrollo de proyectos fotovoltaicos a gran escala, desde etapas de planeación de la red con entidades como la UPME y en la materialización de proyectos desde un estado de prefactibilidad hasta llevarlos a un estado de listos para construir. Actualmente se encuentra en el rol de desarrollador de negocios de una empresa EPC de proyectos de energía renovable en Colombia.
- Rosario Orozco. Ingeniera electricista con más de 25 años de experiencia en el sector eléctrico colombiano. Se destacan sus trabajos en empresas de generación y distribución de energía eléctrica, donde ha realizado roles de desarrollo de nuevos negocios y desarrollo de proyectos. Desde hace 8 años se desempeña como líder de proyectos fotovoltaicos en Colombia para una empresa inversionista en Colombia.
- Ronald Moreno. Ingeniero electrónico con más de 12 años de experiencia en la gestión de activos eléctricos. En los últimos 7 años su enfoque ha sido la planeación del mantenimiento de sistemas fotovoltaicos en Colombia, tanto proyectos a gran escala como proyectos menores.