

GESTIÓN DE PROYECTOS SOLARES CON SEGUIMIENTO MEDIANTE PMI Y
SCRUM EN ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA

Nombre: Berny Alejandro Forero Velez

Asesores:

Ing. Adolfo Leon Agaton

Ing. Cristian Jose Castañeda Junca

Monografía presentada como requisito para optar al título de Ingeniería
Mecatrónica

Fundación Universitaria Agraria de Colombia

Ingeniería

Ingeniería Mecatrónica

Bogotá D.C

2025

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3. JUSTIFICACIÓN	11
4. OBJETIVOS.....	15
5. MARCO CONCEPTUAL.....	16
6. MARCO TEÓRICO	21
7. MARCO LEGAL.....	27
8. DISEÑO METODOLÓGICO	31
9. DESARROLLO Y RESULTADOS DE DISCUSIÓN	35
10. CONCLUSIONES	38
11. RECOMENDACIONES.....	40
12. BIBLIOGRAFÍA.....	42
13. ANEXOS.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de paneles solares fijos y sistemas con seguimiento solar.	4
Figura 2. Gráfica que muestra la diferencia de rendimiento energético entre paneles fijos y móviles.	8
Figura 3. Objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de Naciones Unidas.	13
Figura 4. Paneles solares fotovoltaicos instalados en campo abierto.	16
Figura 5. Estructura de procesos del PMBOK (Inicio, Planificación, Ejecución, Control y Cierre).	18
Figura 6. Ciclo de Sprint en SCRUM: planificación, ejecución, revisión y retrospectiva.	19
Figura 7. Mapa de radiación solar promedio multianual en Colombia (2010).	22
Figura 8. Sistemas de seguimiento solar: fijo, un eje, un eje en rotación y dos ejes.	23
Figura 9. Diagrama de fases	34

RESUMEN

El crecimiento de los proyectos solares con sistemas de seguimiento en Colombia ha incrementado la necesidad de fortalecer sus esquemas de planificación, ejecución y control, especialmente ante entornos regulatorios exigentes y dinámicos. Sin embargo, en la revisión de literatura se identifican vacíos en la integración estructurada de metodologías tradicionales y ágiles adaptadas al contexto nacional. En este marco, el presente trabajo aborda la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo un modelo teórico de gestión híbrido basado en PMI y Scrum puede mejorar la planificación, ejecución y control de proyectos solares con seguimiento en Colombia?

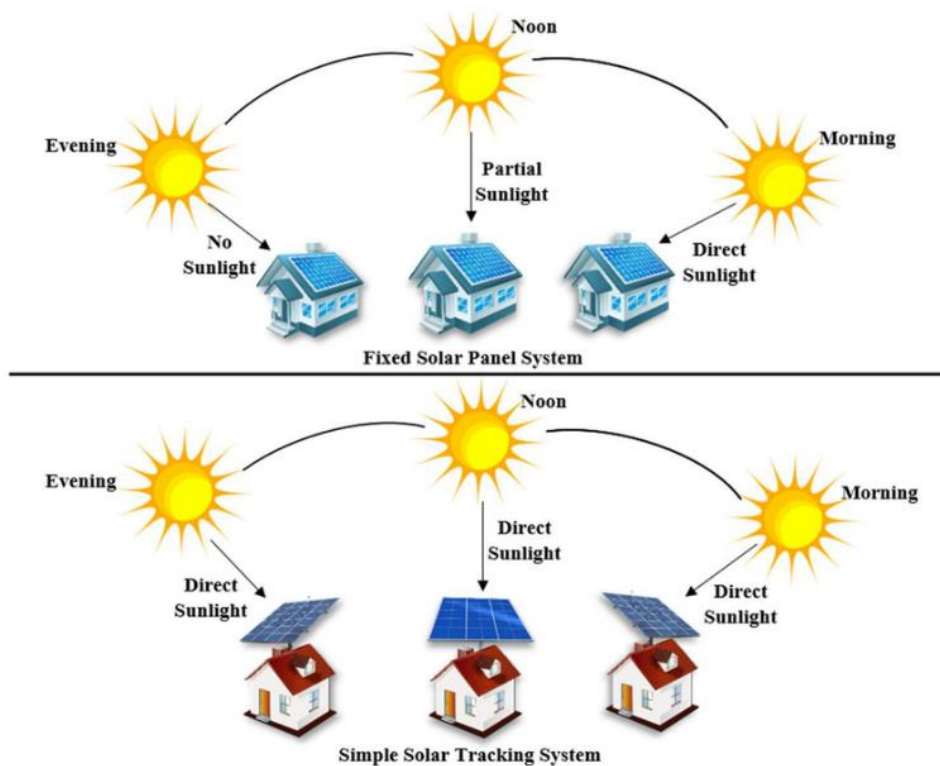
El objetivo general consistió en diseñar un modelo híbrido de gestión fundamentado en los lineamientos del Project Management Institute (PMI) y el marco ágil Scrum, aplicado teóricamente a proyectos solares con seguimiento conectados a red en Colombia. Para ello, se desarrolló una investigación de enfoque cualitativo con método documental, basada en la revisión de literatura especializada, normativa energética nacional y estándares internacionales de gestión de proyectos.

Como resultado, se estructuró un modelo híbrido que integra la rigurosidad metodológica del PMI en las fases de planeación y control, con la adaptabilidad incremental de Scrum en la fase de ejecución. El análisis permitió evidenciar coherencia teórica con estándares internacionales y pertinencia frente al marco regulatorio colombiano. El principal aporte del trabajo radica en la formulación de una propuesta estructurada y contextualizada que fortalece la gestión de proyectos solares con seguimiento, contribuyendo a la eficiencia, trazabilidad y alineación con la transición energética nacional.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la transición energética global, es crucial que se desarrollen tecnologías que optimicen la captura de energía solar. Colombia está bien posicionada para esto y se caracteriza por un mayor potencial de irradiación solar en ciertas áreas, como la Sabana de Bogotá (García et al., 2020). Sin embargo, las pérdidas energéticas derivadas de la falta de mecanismos de seguimiento solar afectan significativamente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos convencionales (Ramírez & López, 2019). Este problema técnico necesita ser resuelto científicamente a través de un sistema de seguimiento automatizado que permita una mejor captura y conversión de energía solar.

Figura 1. Comparación de paneles solares fijos y sistemas con seguimiento solar.



Fuente: Mousazadeh et al. (2009)

La figura 1 contrasta los paneles solares fijos y los que tienen sistemas de seguimiento. Mientras que los sistemas fijos tienen paneles que permanecen en una posición fija todo el día, los sistemas de seguimiento cambian su orientación en respuesta a la dirección del sol, aprovechando más la radiación solar en la superficie. El potencial de aumentar la captura total de energía hasta casi una 30 por ciento, en comparación con las estructuras estáticas (Mousazadeh et al., 2009), es una ganancia importante para los programas solares tanto técnica como financieramente.

Sin embargo, la planificación, diseño e implementación de estos sistemas de seguimiento también implica una mayor integración entre componente mecánicos, eléctricos y de software. Por ello la gestión de proyectos es esencial: la aplicación de metodologías como PMI permite estructurar el alcance, los costos, los riesgos y los cronogramas de manera rigurosa, mientras que SCRUM aporta flexibilidad y adaptabilidad durante la fase de ejecución. La integración de ambos enfoques se convierte en una estrategia clave para asegurar que los proyectos fotovoltaicos con seguimiento en Colombia sean viables, sostenibles y respondan a las necesidades cambiantes del contexto energético nacional.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante los últimos cinco años Colombia ha acelerado su transición energética en, especialmente hacia la integración de energías renovables no tradicionales. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la capacidad de generación solar aumentó un 67,9% en 2021, 109,5 % en 2022, 77,9 % en 2023 y 187,3 % en 2024, triplicando prácticamente la capacidad instalada en tan solo un año (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2025). Durante el año 2024, se añadieron un total de 1.625 MW, de los cuales 1.410 MW fueron para proyectos centralizados y 215 MW para generación distribuida (PV Magazine, 2025). Mientras tanto, la cantidad en porcentaje de energía eólica y solar dentro de la matriz eléctrica nacional aumentó del 1.5% en 2022 a aproximadamente el 9% en 2024 (Stockholm Environment Institute [SEI], 2025).

Colombia tiene potencial para la generación de energía solar, ya que los niveles de irradiación superan los 4,5 kWh/m² en gran parte del territorio y alcanzan más de 6,0 kWh/m² diarios en regiones como La Guajira, el Cesar y el Meta (UPME, 2021). Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de este recurso enfrenta limitaciones técnicas, entre ellas la baja penetración de tecnologías como los sistemas de seguimiento solar, que permiten aumentar la captación energética al orientar dinámicamente los paneles según la posición del sol, mejorando su eficiencia entre un 15 % y 30 % (Mousazadeh et al., 2009).

Aunque los sistemas de seguimiento solar representan una oportunidad clara de mejora en el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas, su diseño e implementación en Colombia aún presentan vacíos significativos en términos de gestión estructurada de proyectos. De acuerdo con la Contraloría General de la República (2024), varios proyectos de energías renovables adjudicados en las subastas de 2019 y 2021 enfrentaron retrasos superiores al 40 % en su cronograma, principalmente por deficiencias en la planificación, dificultades en la adquisición de

terrenos, barreras regulatorias y ausencia de metodologías de gestión estandarizadas. Asimismo, un informe de la UPME (2022) señala que el 65 % de los proyectos solares a gran escala en desarrollo no contaban con un plan robusto de gestión de riesgos, lo que incrementa la probabilidad de sobrecostos y fallas en la ejecución.

En este contexto, la combinación de las metodologías del Project Management Institute (PMI) y de SCRUM aparece como una opción práctica para mejorar la gestión de proyectos fotovoltaicos con sistemas de seguimiento solar. El PMI, a través de su estándar PMBOK, brinda una guía estructurada que ayuda a definir con claridad el alcance, organizar recursos, anticipar y controlar riesgos, además de asegurar que los entregables se cumplan de manera adecuada (PMI, 2021). Por otro lado, SCRUM el marco ágil desarrollado por Schwaber y Sutherland propone ciclos cortos llamados sprints, los cuales permiten obtener resultados parciales de forma constante y facilitan la adaptación a cambios técnicos, normativos o contextuales mediante un trabajo colaborativo y flexible (Schwaber & Sutherland, 2020).

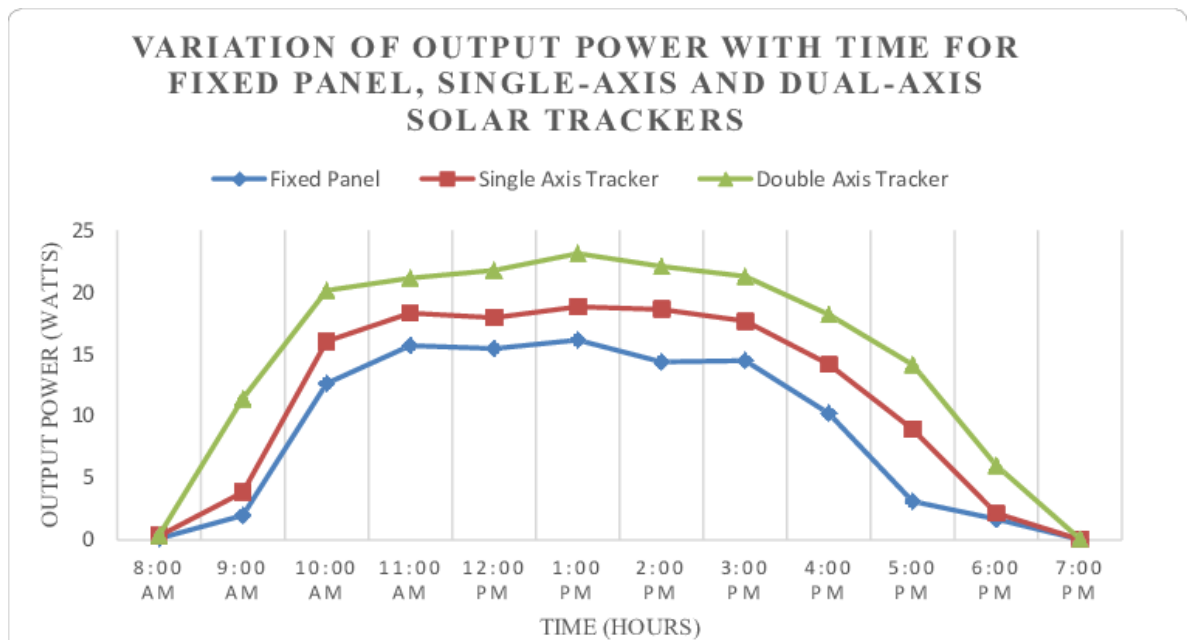
Sin embargo, en Colombia, hay poca o ninguna documentación sobre la adopción conjunta de las metodologías mencionadas en el sector solar, y aún menos para proyectos que utilizan tecnologías de seguimiento solar. Por lo tanto, se necesita el diseño, implementación y validación de un modelo de gestión de proyectos solares con seguimiento, utilizando PMI y SCRUM como herramientas complementarias para aumentar la eficiencia, trazabilidad y adaptabilidad del proceso de desarrollo de este tipo de soluciones energéticas.

Por lo anterior, el propósito de esta monografía es diseñar y validar un modelo de gestión para proyectos fotovoltaicos con sistemas de seguimiento solar en Colombia, apoyado en las metodologías PMI y SCRUM. Este modelo se plantea como una herramienta que pueda replicarse en el sector energético

nacional, contribuyendo a mejorar la planificación, la ejecución y la capacidad de ajuste de estas iniciativas.

Según Huld et al. (2012), los sistemas fotovoltaicos tradicionales colocados en superficies fijas enfrentan el desafío de una eficiencia limitada, ya que su producción es solo una fracción de la radiación solar durante un día. La implementación de los sistemas de seguimiento solar, sea de uno o dos ejes tiene aumentar la captación de energía hasta en un 30% en comparación con los sistemas fijos (LuqueHeredia et al., 2021). Sin embargo, la efectividad de estos es dependiente de diversos factores, como la precisión del seguimiento, el costo de fabricación e instalación y la resistencia a variaciones climáticas extremas (Molina & Pérez, 2018).

Figura 2. Gráfica que muestra la diferencia de rendimiento energético entre paneles fijos y móviles.



Fuente: adaptado de Saqaff Alkaff et al. (2019).

La Figura 2 muestra la variación de la potencia de salida a lo largo del día para tres configuraciones: panel fijo, seguidor de un eje y seguidor de doble eje. Se observa que, mientras los sistemas fijos presentan una curva más limitada y con descensos

abruptos en horas extremas, los sistemas de seguimiento logran mantener valores superiores de potencia durante más tiempo. Particularmente, el seguimiento de doble eje puede permitir un mayor uso de la radiación solar a todas horas del día, con diferencias de hasta un 30% en comparación con los sistemas fijos (Luque-Heredia et al., 2021).

En Colombia se obtuvieron resultados en Bucaramanga, donde un sistema de seguimiento solar de dos ejes presentó mejoras de hasta un 25,7 % en diciembre y un promedio del 17,3 % frente a sistemas fijos. Estos datos confirman que, en el contexto colombiano, la adopción de tecnologías de seguimiento incrementa significativamente la captación de energía, lo cual justifica la necesidad de modelos de gestión robustos para su implementación eficiente (Urbano et al., 2024).

Aun así, su gestión aún se enfrenta a limitaciones relacionadas con la ausencia de modelos metodológicos que integren de manera equilibrada una planificación estructurada con procesos adaptativos. La gestión de proyectos en este sector suele estar guiada por metodologías tradicionales, como las propuestas por el Project Management Institute (PMI). Dichas metodologías ofrecen orden y control al momento de definir el alcance, organizar el cronograma y anticipar riesgos (PMI, 2021). Sin embargo, no siempre consiguen adaptarse con rapidez a los cambios técnicos, normativos o financieros que suelen impactar el desarrollo de proyectos energéticos (UPME, 2022).

En contraste, los marcos ágiles como SCRUM aportan flexibilidad, fomentan la colaboración y permiten entregar resultados de manera incremental (Schwaber & Sutherland, 2020). El inconveniente es que carecen de la estructura formal que demandan proyectos de gran escala, como los relacionados con infraestructura energética. Esta situación evidencia la necesidad de diseñar un marco de gestión híbrido que combine las fortalezas de PMI y SCRUM. Con un enfoque complementario, ambos pueden favorecer

una mejor planificación, una implementación más eficiente y una mayor capacidad de respuesta en los proyectos de seguimiento solar. De este modo, se contribuye a reducir riesgos de retrasos, sobrecostos y uso ineficiente de recursos en Colombia (IEA, 2023; ONU, 2022).

El factor de capacidad para los sistemas fotovoltaicos es del 18% en Colombia, una cifra inferior en comparación con otros países de la región debido a la ineficiencia de los sistemas convencionales (UPME, 2022). Una investigación de instalación realizada en Bogotá demostró que la instalación de seguidores solares en techos industriales aumentaría la producción de energía en un 30% en tales casos sin aumentar la superficie de los paneles (Castañeda et al., 2020). Indicadores clave para evaluar la magnitud del problema incluyen:

- Índice de eficiencia de captación solar (% de radiación aprovechada).
- Producción energética neta (kWh/m²).
- Retorno de inversión (años).
- Reducción de la huella de carbono (kg CO₂ evitados).

¿Cómo un modelo teórico de gestión híbrido basado en PMI y SCRUM puede mejorar la planificación, ejecución y control de proyectos solares con seguimiento en Colombia?

3. JUSTIFICACIÓN

La adopción de sistemas de seguimiento solar automatizado constituye una estrategia fundamental para aumentar la eficiencia energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles en Colombia. Diversos estudios han demostrado que los seguidores solares pueden incrementar la captación energética entre un 15 % y un 30 %, dependiendo de la ubicación geográfica (García, Restrepo & Vargas, 2020; Urbano et al., 2024). Este aumento no solo mejora el rendimiento de los proyectos fotovoltaicos, sino que también permite validar modelos de optimización energética aplicables a regiones con condiciones de radiación similares (Navarro et al., 2022). Asimismo, en comparación con sistemas estáticos, la orientación inteligente en tiempo real puede incrementar la producción hasta en un 30 % (Kalogirou, 2014), lo que resulta especialmente relevante en zonas rurales o aisladas donde el suministro eléctrico es limitado o inestable.

El contexto nacional evidencia la necesidad de fortalecer la eficiencia y la gestión de los proyectos solares. La capacidad instalada pasó de 25 MW en 2018 a más de 1.500 MW en 2023, un crecimiento superior al 5.800 %, impulsado por políticas como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 (UPME, 2022). Sin embargo, el país mantiene un factor de capacidad promedio del 18 %, por debajo del potencial esperado y de referentes regionales como Chile (23–25 %) (IEA, 2023). Esto revela una brecha técnica vinculada a la adopción de tecnologías de seguimiento y, especialmente, a la gestión integral de los proyectos. En Colombia, las normas técnicas como el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la Resolución CREG 174 de 2021 sobre conexión a red exigen procesos de

planificación y coordinación rigurosos, cuyo cumplimiento depende directamente de prácticas de gestión robustas.

En este contexto, la incorporación de metodologías de gestión como PMI y SCRUM adquiere relevancia estratégica. La evidencia internacional indica que la aplicación de marcos de gestión híbridos puede reducir entre un 10 % y un 30 % los retrasos en proyectos tecnológicos y disminuir los sobrecostos entre un 15 % y un 25 % gracias a una mejor definición del alcance, control de riesgos y comunicación continua (PMI, 2021; Schwaber & Sutherland, 2020). En proyectos solares, donde los retrasos en suministros, fallas de coordinación interdisciplinaria y cambios en diseño son frecuentes, este enfoque permite mejorar la trazabilidad, acelerar la toma de decisiones y garantizar el cumplimiento normativo. De manera específica, un modelo híbrido aplicado a proyectos solares con sistemas de seguimiento podría reducir tiempos de aprobación técnica hasta en un 20 % gracias a la documentación estructurada recomendada por PMI, y disminuir los riesgos operativos mediante iteraciones tempranas propias de SCRUM.

Los beneficios generados se extienden también al entorno social y económico. Los sistemas de seguimiento solar permiten incrementar la producción energética, lo que se traduce en mayor estabilidad para comunidades rurales y reducción de costos asociados a combustibles fósiles o sistemas alternativos (García et al., 2020). A nivel macro, aportan a la transición energética definida por el Gobierno Nacional a través de la Política de Transición Energética (CONPES 4075 de 2022)

y contribuyen al cumplimiento del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 en lo referente a energías limpias.

Figura 3. Objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de Naciones Unidas.



Fuente: ONU (2023).

En coherencia con la Agenda 2030, este proyecto se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (Energía asequible y no contaminante) y 13 (Acción por el clima), al promover la eficiencia energética y la reducción de emisiones (ONU, 2023). Adicionalmente, impacta de manera indirecta los ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) y 9 (Industria, innovación e infraestructura), al fomentar capacidades técnicas y oportunidades de innovación en el sector fotovoltaico. La Figura 3 presenta la representación oficial de los ODS como guía metodológica para contextualizar estas contribuciones.

Desde el ámbito académico, este proyecto se articula con la línea institucional de Energías Renovables del programa de Ingeniería Mecatrónica, fortaleciendo la formación en gestión de proyectos aplicada a tecnologías limpias. La integración de PMI y SCRUM permite que los estudiantes y profesionales desarrollen competencias en planificación, trabajo interdisciplinario, documentación técnica y adaptación a requisitos normativos locales, especialmente aquellos relacionados con la conexión a red y seguridad eléctrica. Así, además de aportar al desarrollo tecnológico del país, esta investigación contribuye a mejorar la pertinencia curricular del programa y a fomentar la formación de ingenieros capaces de liderar proyectos en energías limpias.

En conjunto, la implementación de sistemas de seguimiento solar automatizado se justifica desde una perspectiva técnica, ambiental, social, económica y formativa. Su desarrollo impulsa la productividad energética, promueve prácticas de gestión eficientes, contribuye a políticas nacionales y globales, y fortalece las capacidades profesionales en el campo de las energías renovables, consolidando un aporte directo al sector fotovoltaico colombiano y a la formación integral de ingenieros mecatrónicos.

4. OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar un modelo híbrido de gestión basado en PMI y Scrum para proyectos solares con seguimiento conectados a red en Colombia, fundamentado en análisis documental y revisión de literatura especializada.

Objetivos específicos

- Caracterizar las metodologías de gestión empleadas en proyectos solares con seguimiento en Colombia mediante revisión documental y normativa.
- Integrar lineamientos de PMI y Scrum en un modelo híbrido aplicable al contexto solar, definiendo procesos y roles desde la literatura.
- Analizar la coherencia, aplicabilidad y limitaciones del modelo mediante comparación teórica con estándares internacionales.

5. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo de la presente monografía se definen los siguientes conceptos clave, los cuales permiten delimitar el objeto de estudio y comprender la aplicación de las metodologías de gestión empleadas en proyectos solares con sistemas de seguimiento:

Energía solar fotovoltaica: Tecnología que permite la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. En Colombia, su implementación ha presentado un crecimiento sostenido en la última década, impulsado por el alto potencial de radiación solar y por el marco normativo de fomento a las energías renovables (IEA, 2023).

Figura 4. Paneles solares fotovoltaicos instalados en campo abierto.



Fuente: Pixabay (2015).

- **Sistemas de seguimiento solar:** Conjunto de dispositivos mecánicos, eléctricos y de control que orientan los módulos fotovoltaicos según la posición del sol a lo largo del día. Estos sistemas pueden ser de uno o dos ejes y permiten incrementar la captación de radiación solar hasta en un 40 % frente a estructuras fijas, mejorando el rendimiento energético del sistema (Kalogirou, 2014).
- **Eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos:** Relación entre la energía solar incidente captada por el sistema y la energía eléctrica efectivamente entregada a la red o al punto de consumo. La incorporación de sistemas de seguimiento solar busca maximizar esta eficiencia y, en consecuencia, la rentabilidad técnica y económica de los proyectos (García et al., 2020).
- **Gestión de proyectos:** Aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades de un proyecto con el fin de cumplir los requisitos definidos en términos de alcance, tiempo, costo y calidad (PMI, 2021).
- **Triple restricción:** Concepto que describe el equilibrio entre alcance, tiempo y costo en un proyecto, manteniendo la calidad como un elemento transversal. En proyectos de energía solar, esta restricción adquiere especial relevancia debido a la necesidad de garantizar la viabilidad técnica, económica y regulatoria (Kerzner, 2017).
- **Metodología PMI (Project Management Institute):** Marco de buenas prácticas para la gestión de proyectos que organiza el trabajo a través de áreas de conocimiento y grupos de procesos, orientados a la planificación, ejecución, monitoreo y control de proyectos en diversos sectores, incluido el energético (PMI, 2021).

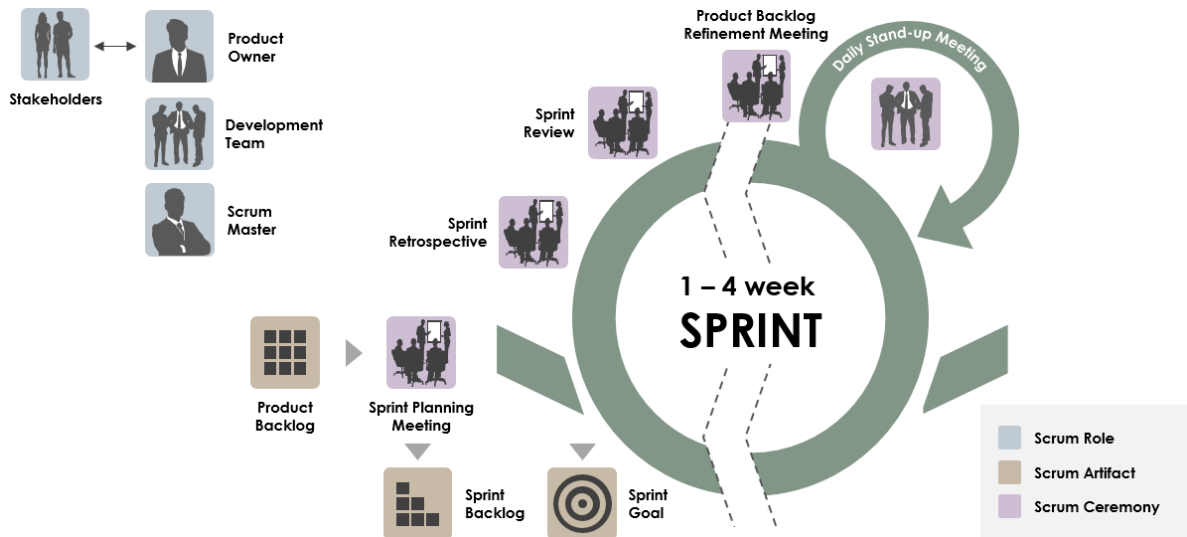
Figura 5. Estructura de procesos del PMBOK (Inicio, Planificación, Ejecución, Control y Cierre).

Process Groups	Initiating	Planning	Executing	Monitoring and Controlling	Closing
Project Integration Management	<ul style="list-style-type: none"> Develop Project Charter 	<ul style="list-style-type: none"> Develop Project Management Plan 	<ul style="list-style-type: none"> Direct and Manage Project Work Manage Project Knowledge 	<ul style="list-style-type: none"> Monitor and Control Project Work Perform Integrated Change Control 	<ul style="list-style-type: none"> Close Project or Phase
Project Scope Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Scope Management Collect Requirements Define Scope Create WBS 		<ul style="list-style-type: none"> Validate Scope Control Scope 	
Project Schedule Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Schedule Management Define Activities Sequence Activities Estimate Activity Durations Develop Schedule 		<ul style="list-style-type: none"> Control Schedule 	
Project Cost Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Cost Management Estimate Costs Determine Budget 		<ul style="list-style-type: none"> Control Costs 	
Project Quality Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Quality Management 	<ul style="list-style-type: none"> Manage Quality 	<ul style="list-style-type: none"> Control Quality 	
Project Resource Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Resource Management Estimate Activity Resources 	<ul style="list-style-type: none"> Acquire Resources Develop Team Manage Team 	<ul style="list-style-type: none"> Control Resources 	
Project Communications Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Communications Management 	<ul style="list-style-type: none"> Manage Communications 	<ul style="list-style-type: none"> Monitor Communications 	
Project Risk Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Risk Management Identify Risks Perform Qualitative Risk Analysis Perform Quantitative Risk Analysis Plan Risk Responses 	<ul style="list-style-type: none"> Implement Risk Responses 	<ul style="list-style-type: none"> Monitor Risks 	
Project Procurement Management		<ul style="list-style-type: none"> Plan Procurement Management 	<ul style="list-style-type: none"> Conduct Procurements 	<ul style="list-style-type: none"> Control Procurements 	
Project Stakeholder Management	<ul style="list-style-type: none"> Identify Stakeholders 	<ul style="list-style-type: none"> Plan Stakeholder Engagement 	<ul style="list-style-type: none"> Manage Stakeholder Engagement 	<ul style="list-style-type: none"> Monitor Stakeholder Engagement 	

Fuente: Visual-Paradigm (2023).

- Metodología SCRUM:** Marco de trabajo ágil basado en principios de colaboración, iteración e incrementalidad, que estructura el desarrollo de proyectos en ciclos cortos denominados Sprints, permitiendo la entrega progresiva de resultados y la adaptación temprana a cambios (Schwaber & Sutherland, 2020).

Figura 6. Ciclo de Sprint en SCRUM: planificación, ejecución, revisión y retrospectiva.



Fuente: Visual-Paradigm (2023).

- **Iteración e incrementalidad:** Principios fundamentales de las metodologías ágiles, particularmente de SCRUM, mediante los cuales el proyecto se desarrolla en ciclos repetitivos que generan resultados parciales y verificables, facilitando la retroalimentación continua y la mejora progresiva (Schwaber & Sutherland, 2020).
- **Modelo de gestión de proyectos:** Representación estructurada que integra metodologías, procesos y herramientas para dirigir un proyecto, facilitando su planificación, ejecución, seguimiento y cierre, de acuerdo con los objetivos estratégicos definidos.
- **Planificación adaptativa:** Estrategia de gestión que permite ajustar los planes del proyecto conforme se presentan cambios en el entorno técnico, normativo o económico, contribuyendo a la reducción de riesgos y a una mayor capacidad de respuesta ante la incertidumbre.

- **Riesgos en proyecto solares:** Eventos o condiciones potenciales que pueden afectar negativamente el desarrollo de un proyecto solar, tales como variaciones climáticas, fallos tecnológicos, retrasos en la cadena de suministro o cambios regulatorios, los cuales deben ser identificados y gestionados de forma sistemática (Navarro et al., 2022).
- **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):** Agenda global establecida por las Naciones Unidas orientada a enfrentar desafíos ambientales, sociales y económicos. En el contexto de los proyectos solares, destacan el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima), debido a su relación directa con la transición energética y la mitigación del cambio climático (ONU, 2023).

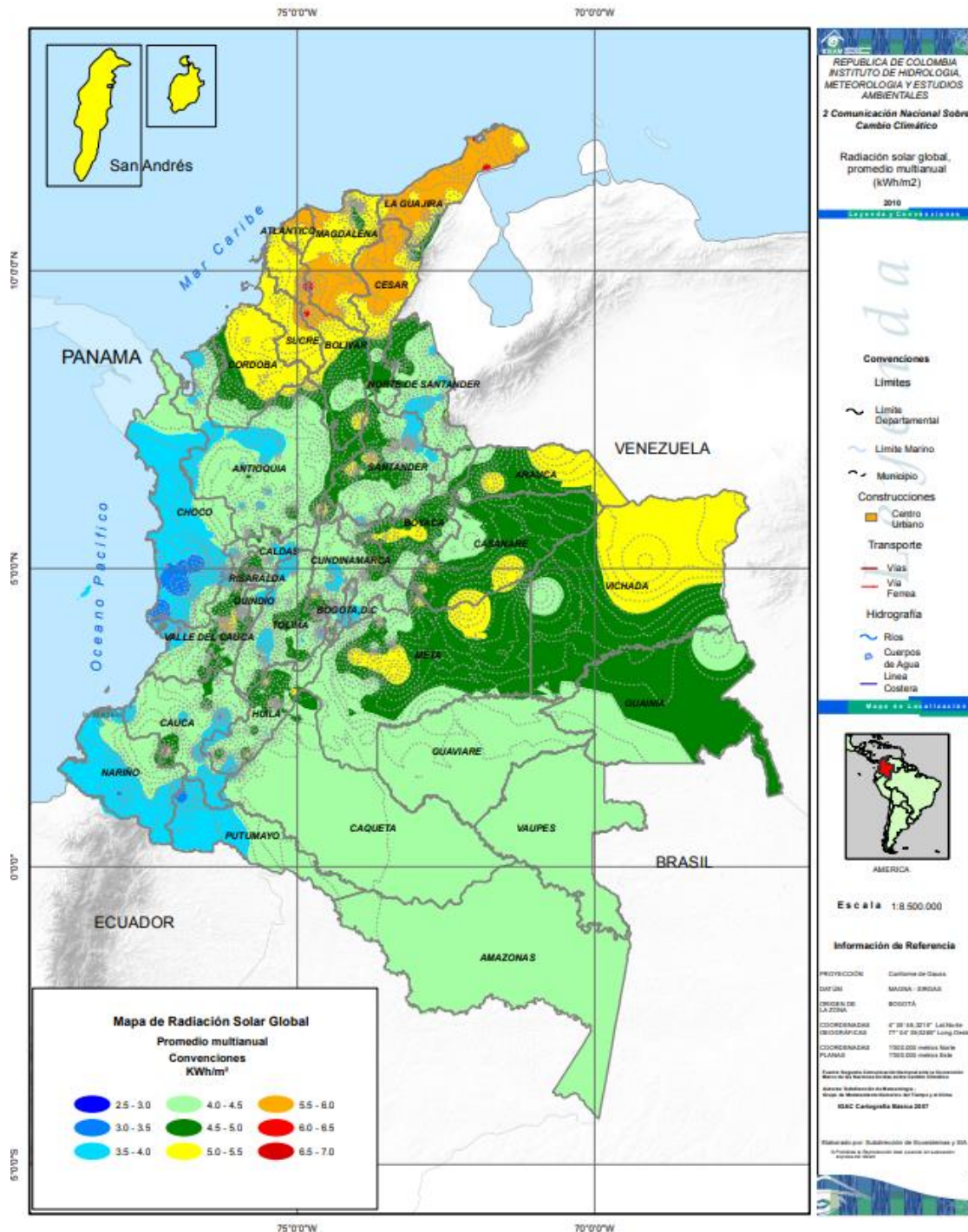
6. MARCO TEÓRICO

Energía solar fotovoltaica y sistemas de seguimiento solar

La energía solar fotovoltaica constituye una fuente renovable que transforma la radiación solar directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Este fenómeno ocurre cuando la radiación incide sobre materiales semiconductores, como el silicio, generando una diferencia de potencial que permite la circulación de corriente eléctrica (Méndez Gamboa & Ríos Chávez, 2019). Debido a su disponibilidad y bajo impacto ambiental, esta tecnología ha experimentado un crecimiento acelerado a nivel mundial, especialmente en países con altos niveles de irradiación solar.

En el contexto colombiano, el recurso solar presenta condiciones favorables tanto en términos de disponibilidad como de distribución geográfica. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el país cuenta con una irradiación solar promedio superior a 4,5 kWh/m²-día, destacándose regiones como La Guajira, los Llanos Orientales y el norte del departamento del Cesar, donde se alcanzan valores significativamente superiores al promedio nacional (UPME, 2021). Estas condiciones convierten al territorio colombiano en un escenario estratégico para el desarrollo de proyectos solares conectados a red, particularmente en zonas con limitada infraestructura energética convencional.

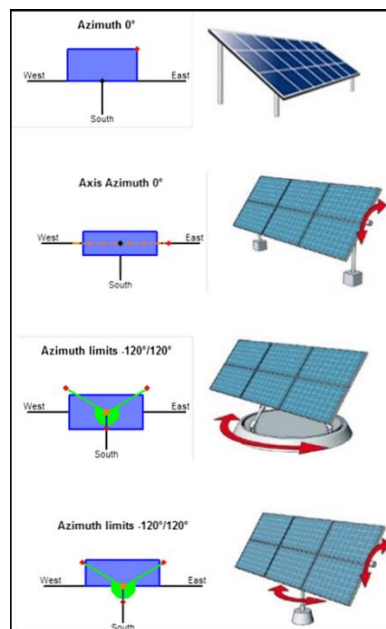
Figura 7. Mapa de radiación solar promedio multianual en Colombia (2010).



Fuente: IDEAM-galería de mapas/datos abiertos (consultado el 8 de septiembre de 2025).

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en estructuras fijas o en sistemas que incorporan mecanismos de seguimiento solar (solar trackers). Los sistemas de seguimiento solar consisten en dispositivos mecánicos, eléctricos y de control que ajustan la orientación de los paneles para seguir la trayectoria aparente del sol durante el día, optimizando el ángulo de incidencia de la radiación solar y maximizando la producción energética (Mousazadeh et al., 2009). Estos sistemas se dividen principalmente en seguidores de un eje (horizontal o vertical) y de dos ejes, siendo estos últimos los que ofrecen una mayor precisión en el seguimiento solar.

Figura 8. Sistemas de seguimiento solar: fijo, un eje, un eje en rotación y dos ejes.



Fuente: Saqaff Alkaff et al. (2019).

Diversos estudios técnicos indican que los sistemas de seguimiento pueden incrementar la producción de energía entre un 15 % y un 30 % frente a sistemas fijos, dependiendo de factores como la ubicación geográfica, el clima y el tipo de tecnología empleada (Kacira et al., 2006). No obstante, su implementación implica

mayores costos iniciales y una complejidad superior en la operación y mantenimiento, lo cual exige una gestión del proyecto más rigurosa y estructurada.

En Colombia, la adopción de sistemas de seguimiento solar ha sido limitada en comparación con otros países de la región, debido a barreras asociadas al desconocimiento técnico, la percepción de riesgo financiero y la ausencia de modelos de gestión que integren adecuadamente los aspectos técnicos, normativos y organizacionales. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer los enfoques de gestión de proyectos que permitan reducir incertidumbres y mejorar la viabilidad de este tipo de soluciones tecnológicas.

Desde el punto de vista tecnológico, los avances en la fabricación de paneles fotovoltaicos han dado lugar a distintas tipologías con aplicaciones específicas. Los paneles de silicio cristalino, tanto monocristalinos como policristalinos, representan aproximadamente el 90 % del mercado global, debido a su alta eficiencia y durabilidad (IEA, 2023). Los módulos monocristalinos alcanzan eficiencias superiores al 20 %, mientras que los policristalinos presentan eficiencias entre el 15 % y el 18 %, con menores costos de producción (Méndez Gamboa & Ríos Chávez, 2019).

Adicionalmente, las tecnologías de película delgada, como CdTe, CIGS y silicio amorfo, ofrecen ventajas en términos de flexibilidad y desempeño bajo condiciones de baja radiación, aunque con eficiencias más reducidas (10–14 %) (Fraunhofer ISE, 2022). Tecnologías más recientes, como los paneles bifaciales y los módulos con tecnología PERC, han mejorado la captación de radiación y reducido pérdidas energéticas, resultando especialmente adecuadas para proyectos que integran sistemas de seguimiento solar (IEA, 2023).

La operación eficiente de los sistemas de seguimiento requiere algoritmos de control que permitan orientar los paneles hacia la posición óptima del sol en cada instante. Estas estrategias se clasifican principalmente en algoritmos astronómicos y algoritmos sensorizados. Los algoritmos astronómicos utilizan modelos

matemáticos basados en la ubicación geográfica, fecha y hora para determinar la posición solar, siendo el Solar Position Algorithm (SPA) del NREL uno de los más utilizados por su alta precisión (Reda & Andreas, 2004). Por su parte, los algoritmos sensorizados emplean dispositivos como fotorresistencias o sensores de radiación para detectar la dirección de mayor irradiancia, ofreciendo soluciones más simples y económicas, aunque con menor precisión en condiciones climáticas variables (Mousazadeh et al., 2009).

En sistemas híbridos, ambas estrategias se combinan para maximizar la captación de energía y mejorar la eficiencia global del sistema, lo cual incrementa la complejidad técnica y refuerza la necesidad de una gestión estructurada del proyecto (Navarro et al., 2022).

Gestión de proyectos según la metodología PMI

La gestión de proyectos tiene como finalidad planificar, ejecutar y controlar los recursos y actividades necesarias para alcanzar objetivos definidos dentro de un marco de tiempo, costo y calidad. El Project Management Institute (PMI) define un proyecto como un esfuerzo temporal orientado a crear un producto, servicio o resultado único (PMI, 2021).

La Guía del PMBOK estructura la gestión de proyectos en cinco grupos de procesos inicio, planificación, ejecución, monitoreo y control, cierre. En diversas áreas de conocimiento, tales como alcance, cronograma, costos, calidad, recursos, comunicaciones, riesgos, adquisiciones y gestión de los interesados (PMI, 2021). Este enfoque proporciona una base metodológica sólida para proyectos de infraestructura y tecnología, como los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar.

En proyectos energéticos, la metodología PMI resulta especialmente relevante debido a su énfasis en la planificación detallada, la gestión de riesgos y el control de cambios, aspectos críticos frente a variables como la normativa eléctrica, la disponibilidad de equipos y las condiciones ambientales (Kerzner, 2017). Sin embargo, su carácter predictivo puede limitar la capacidad de respuesta ante

cambios tecnológicos o regulatorios durante la ejecución, lo que ha motivado la adopción de enfoques complementarios.

Metodología SCRUM para proyectos técnico

SCRUM es un marco ágil orientado al desarrollo de productos complejos mediante ciclos iterativos e incrementales, promoviendo la colaboración, la transparencia y la mejora continua (Schwaber & Sutherland, 2020). Define roles, eventos y artefactos que facilitan la gestión de actividades en entornos con alta incertidumbre.

En proyectos técnicos y energéticos, SCRUM permite gestionar fases de desarrollo que requieren ajustes frecuentes, como el diseño de sistemas de control, la integración de sensores o la validación funcional de soluciones. Aunque no sustituye una planificación estructurada, complementa metodologías tradicionales al facilitar la adaptación temprana a cambios técnicos o normativos (Rigby et al., 2016).

Enfoques híbridos de gestión: Integración de PMI y SCRUM

La literatura reciente destaca la eficacia de los modelos híbridos de gestión en proyectos complejos de ingeniería, al combinar la rigurosidad del enfoque predictivo con la flexibilidad de los marcos ágiles (Conforto et al., 2016). En este tipo de modelos, PMI se utiliza para definir el alcance, los riesgos, el cronograma y los costos, mientras que SCRUM se aplica en etapas de desarrollo, validación y mejora continua.

Estudios como el de Serrador y Pinto (2015) evidencian que los enfoques híbridos mejoran el desempeño del proyecto y la satisfacción de los interesados, al equilibrar control y adaptabilidad. En el contexto colombiano, la integración PMI–SCRUM se plantea como una alternativa metodológica que permite abordar las particularidades técnicas, regulatorias y organizacionales de los proyectos solares con sistemas de seguimiento, contribuyendo a una gestión más eficiente y coherente con la transición energética del país.

7. MARCO LEGAL

El desarrollo de proyectos fotovoltaicos con sistemas de seguimiento solar en Colombia se encuentra respaldado por un marco legal y normativo que promueve el uso de energías renovables, garantiza la seguridad de las instalaciones eléctricas y regula la conexión de estos proyectos al sistema eléctrico nacional. Dicho marco resulta determinante para la planificación, ejecución y control de los proyectos, por lo que su integración en los modelos de gestión constituye un elemento clave.

Desde el ámbito constitucional, el artículo 79 de la Constitución Política de Colombia establece el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y asigna al Estado la responsabilidad de proteger la diversidad e integridad del ambiente. Este mandato fundamenta la promoción de fuentes de energía limpias y sostenibles, como la energía solar fotovoltaica, y orienta la formulación de políticas públicas en materia energética y ambiental.

En el plano legal, la Ley 697 de 2001 declaró de interés público el uso eficiente y racional de la energía, así como la promoción de fuentes alternativas. Posteriormente, la Ley 1715 de 2014 constituyó el principal instrumento normativo para la integración de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) al sistema energético nacional, al establecer incentivos tributarios, arancelarios y contables para los proyectos que incorporan este tipo de tecnologías. Esta ley impacta directamente la fase de formulación y viabilidad financiera de los proyectos solares, al influir en la estructuración de costos, cronogramas y análisis de beneficios económicos.

El Decreto 1073 de 2015 compiló la normativa del sector minero-energético, mientras que la Ley 2099 de 2021 actualizó y fortaleció el marco de la Ley 1715, ampliando los incentivos existentes y alineando la política energética nacional con los compromisos de transición energética y mitigación del cambio climático. Estas disposiciones inciden en la gestión del alcance y de los riesgos regulatorios de los

proyectos solares, aspectos que deben ser considerados desde la fase de planificación bajo enfoques como PMI.

En materia de planeación y regulación, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) cumplen un papel fundamental en la definición de lineamientos técnicos, económicos y regulatorios para la expansión y operación de proyectos de generación solar. Instrumentos como el Plan Energético Nacional 2022–2050 establecen metas estratégicas para la diversificación de la matriz energética, lo cual condiciona la priorización y viabilidad de proyectos solares conectados a red.

En este contexto, la normativa de conexión a red resulta esencial para la coherencia técnica y operativa de los proyectos fotovoltaicos. La Resolución CREG 174 de 2021 regula los procedimientos y requisitos para la conexión de proyectos de generación al Sistema Interconectado Nacional, incluyendo aspectos técnicos, administrativos y de coordinación con los operadores de red. Su cumplimiento impacta directamente la gestión del cronograma, la coordinación con los interesados y la mitigación de riesgos asociados a retrasos en aprobaciones y permisos, lo cual refuerza la necesidad de modelos de gestión estructurados y adaptativos.

Desde el punto de vista técnico, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), actualizado mediante la Resolución 40117 del 2 de abril de 2024, establece los requisitos de seguridad obligatorios para el diseño, construcción y operación de instalaciones eléctricas en Colombia. En particular, el RETIE define exigencias específicas para instalaciones fotovoltaicas, tales como la certificación de módulos, inversores, sistemas de almacenamiento, estructuras de soporte, puesta a tierra, análisis de riesgos eléctricos y protección contra descargas atmosféricas, conforme a normas internacionales IEC. Estas disposiciones inciden directamente en la gestión de la calidad, los riesgos técnicos y el control de cambios durante la ejecución del proyecto.

De manera complementaria, la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 de 2019, en su sección 6-90, regula las instalaciones eléctricas en baja tensión asociadas a sistemas fotovoltaicos, incluyendo los criterios de interconexión con la red, las protecciones eléctricas y las condiciones de operación segura. Su aplicación garantiza que los proyectos cumplan estándares de calidad y seguridad reconocidos internacionalmente, adaptados al contexto colombiano.

En el ámbito internacional, Colombia ha asumido compromisos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima), así como el Acuerdo de París. Estos compromisos refuerzan la pertinencia de los proyectos solares y justifican la adopción de modelos de gestión que aseguren su sostenibilidad técnica, ambiental y económica (ONU, 2023).

En el ámbito técnico, resulta indispensable considerar el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2024), expedido mediante la Resolución 40117 del 2 de abril de 2024 por el Ministerio de Minas y Energía, en este se establece los requisitos de seguridad en el diseño, construcción y operación de instalaciones eléctricas en Colombia, estos principalmente son:

- **Numeral 20.22 L:** Obliga a que los paneles solares fotovoltaicos cuenten con certificación de conformidad, cumpliendo normas IEC 61215 (cristalinos) o IEC 61646 (de capa delgada).
- **Numeral 20.22 M:** Exige que los inversores solares tengan certificación bajo la norma IEC 62109-1 y 62109-2 para garantizar seguridad eléctrica.
- **Numeral 20.22 N:** Establece que los sistemas de almacenamiento (baterías) asociados a instalaciones solares deben cumplir la IEC 62619 (baterías de litio) o IEC 60896 (plomo-ácido).
- **Numeral 20.22 P:** Determina que las estructuras metálicas de soporte de los paneles y seguidores solares deben garantizar puesta a tierra, resistencia mecánica y cumplimiento con IEC 62548 (instalaciones FV).

- **Título 5 – Art. 1.5.1 (Libro 1):** Indica que todo proyecto eléctrico debe realizar un análisis de riesgos de origen eléctrico y definir medidas de protección contra sobrecorriente, sobretensión, fallas de aislamiento y descargas atmosféricas.
- **Numeral 20.22 Q:** Señala que los cables solares deben cumplir con la norma IEC 62930, diseñada para aplicaciones fotovoltaicas, resistentes a radiación UV, humedad y cambios de temperatura.
- **Numeral 20.22 R:** Define requisitos de protección contra descargas atmosféricas en instalaciones solares, exigiendo cumplimiento con la norma IEC 62305.

El marco normativo colombiano incluye disposiciones específicas para sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar, orientadas a garantizar seguridad eléctrica, confiabilidad y protección de personas y equipos, cuyo cumplimiento es obligatorio (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

Finalmente, aunque el ordenamiento jurídico colombiano no exige la aplicación obligatoria de metodologías específicas de gestión de proyectos, marcos como PMI y SCRUM son reconocidos como buenas prácticas internacionales. Su integración en proyectos solares con sistemas de seguimiento permite articular los requerimientos legales y técnicos con procesos de planificación, ejecución, control y adaptación, facilitando que los beneficios normativos y regulatorios se materialicen de manera efectiva en el contexto colombiano.

8. DISEÑO METODOLÓGICO

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cualitativo y documental, con carácter descriptivo y proyectivo, orientado al diseño teórico de un modelo híbrido de gestión basado en PMI y Scrum para proyectos solares con seguimiento en Colombia. Se clasifica como investigación no experimental, dado que no se manipulan variables ni se aplican pruebas en campo; el análisis se fundamenta exclusivamente en literatura especializada, normativa técnica y estándares de gestión.

La investigación no formula hipótesis ni define población o muestra, ya que su propósito es construir una propuesta metodológica desde el análisis conceptual. El trabajo se sustenta en técnicas de análisis documental, análisis de contenido y comparación estructural de metodologías, lo cual permite derivar lineamientos coherentes con el contexto colombiano.

Aunque el énfasis del proyecto está en la gestión, se describen brevemente los componentes técnicos asociados a los sistemas de seguimiento solar mecánico, eléctrico y de control porque constituyen el tipo de proyecto al cual se orienta el modelo.

Proceso metodológico

El proceso se estructura en dos fases alineadas con los objetivos específicos y se complementa con la elaboración de anexos académicos que representan los entregables teóricos derivados de la aplicación conceptual de PMI y Scrum.

Fase 1. Análisis documental y estructuración de elementos del PMI

Esta fase emplea análisis de contenido y revisión normativa para caracterizar las prácticas de gestión aplicadas en proyectos solares con seguimiento y para identificar los elementos que deben integrar un modelo teórico de gestión.

Como resultado de este análisis, se desarrollaron los siguientes anexos académicos basados en la metodología PMI, contruidos conceptualmente para ilustrar la estructura del modelo:

- Acta de constitución del proyecto.
- Estructura de desglose del trabajo (EDT).
- Árbol del problema y árbol de objetivos.
- Matriz de comunicación, incluyendo análisis de interesados y matriz de poder.
- Matriz de marco lógico.
- Cronograma de referencia.
- Matriz de ponderación y matriz de presupuesto.
- Matriz de gestión del riesgo y de calidad.

Estos documentos no provienen de un proyecto real, sino que fueron desarrollados mediante simulación académica, siguiendo las guías del PMBOK 7 y la normativa técnica colombiana.

Fase 2. Construcción del modelo SCRUM y elaboración de artefactos ágiles

A partir de la revisión del Scrum Guide (2020) y literatura relacionada, se desarrollaron los elementos conceptuales del modelo ágil complementario al PMI.

En esta fase se elaboraron los siguientes anexos académicos asociados a SCRUM:

- Definición de roles (Scrum Master, Product Owner y equipo de desarrollo), adaptados teóricamente a proyectos solares con seguimiento.

- Estructura de planificación de Sprints para el desarrollo del modelo híbrido.
- Simulación de daily meetings
- Guías para revisiones y retrospectivas al final de cada Sprint.
- Incrementos funcionales

Estos entregables funcionan como representaciones conceptuales de cómo se aplicaría la metodología Scrum en un proyecto de esta naturaleza, sin ejecución real.

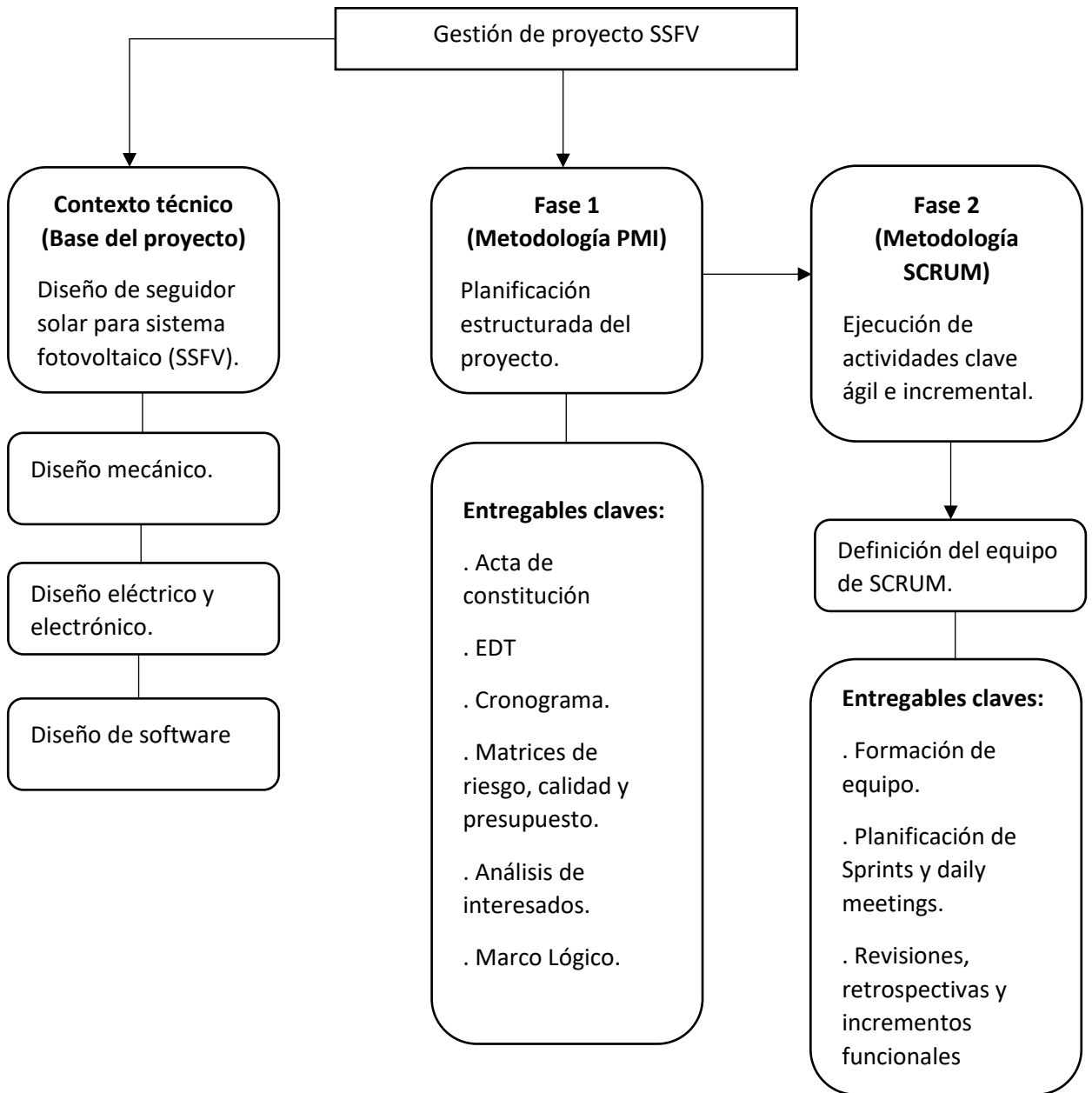
Integración metodológica

Finalmente, se realiza una síntesis comparativa y analítica entre PMI y Scrum para construir el modelo híbrido, integrando:

- fases
- roles
- artefactos
- mecanismos de control
- criterios técnicos del sector fotovoltaico,
- normativa colombiana aplicable (RETIE 2024, NTC 2050).

La evaluación del modelo se efectúa desde un enfoque teórico, contrastando su coherencia con estándares internacionales, sin validación práctica en proyectos reales.

Figura 9. Diagrama de fases



Fuente: Propia. (2025)

9. DESARROLLO Y RESULTADOS DE DISCUSIÓN

El desarrollo del proyecto se estructuró mediante un modelo de gestión híbrido, que integra la metodología tradicional PMI para las fases de inicio y planificación, y la metodología ágil SCRUM para las fases de ejecución, seguimiento y validación. Esta combinación permitió aprovechar el rigor técnico del enfoque predictivo y, simultáneamente, la flexibilidad requerida en proyectos solares con sistemas de seguimiento, caracterizados por alta incertidumbre técnica, regulatoria y ambiental.

La aplicación del modelo híbrido se documentó y validó a través de un conjunto de anexos técnicos, los cuales no solo respaldan la investigación, sino que se vinculan de manera directa con los objetivos específicos planteados en la monografía.

- **Acta de constitución del proyecto (Anexo1):** Permitted formalizar el propósito, alcance, restricciones y supuestos del proyecto, alineándolo con la transición energética colombiana y con el objetivo general de diseñar un modelo de gestión replicable para proyectos solares con seguidores. Este instrumento garantizó coherencia entre la planificación inicial y las decisiones posteriores del modelo.
- **Estructura de desglose del trabajo (EDT):** Facilitó la descomposición del proyecto en paquetes de trabajo controlables, estableciendo una relación clara entre entregables, fases y responsables. Su aplicación evidenció la utilidad del PMI para estructurar proyectos solares complejos y contribuyó directamente al objetivo específico 2, al demostrar cómo las áreas de conocimiento del PMI permiten organizar y controlar el alcance del proyecto.
- **Árbol de Problemas (Anexo 3) y Árbol de Objetivos (Anexo 4):** Constituyeron una herramienta de análisis causal que permitió identificar factores críticos asociados a la baja eficiencia en proyectos fotovoltaicos, tales como la ausencia de modelos de gestión híbridos, la

deficiente gestión de riesgos regulatorios y las fallas en la comunicación entre interesados. A partir de este análisis, se formularon objetivos estratégicos orientados a mejorar el desempeño técnico y organizacional mediante el uso de sistemas de seguimiento solar y una gestión estructurada, dando cumplimiento al objetivo específico 1.

- **Matriz de comunicación, de interesados y de poder (Anexos 5, 6 y 7):** Permitieron caracterizar y clasificar a los actores involucrados, evaluando su nivel de influencia e interés en el proyecto. Estos instrumentos fortalecieron la toma de decisiones y redujeron riesgos asociados a conflictos entre partes interesadas, aspecto crítico en proyectos solares conectados a red en el contexto colombiano.
- **Matriz de marco lógico (Anexo 8):** Estructuró la relación entre objetivos, indicadores verificables, medios de verificación y supuestos, facilitando la trazabilidad entre las acciones del proyecto y los resultados esperados. Este enfoque permitió evaluar la coherencia interna del modelo de gestión propuesto.
- **Cronograma de actividades (Anexo 9):** Desarrollado mediante un diagrama de Gantt, permitió analizar la secuencia y duración de las actividades. Comparativamente, el uso de SCRUM en la fase de validación evidenció una mayor capacidad de ajuste frente a cambios en los entregables, lo que sugiere una mejora potencial en la gestión del tiempo frente a esquemas completamente predictivos, aunque sin cuantificación estadística debido al carácter metodológico del estudio.
- **Matriz de ponderación y presupuesto (Anexos 10 y 11):** Facilitaron la priorización de alternativas y la asignación de recursos financieros. Su aplicación permitió analizar la viabilidad económica del modelo, evidenciando que una adecuada planificación reduce la probabilidad de sobrecostos asociados a reprocesos y cambios tardíos.
- **Matriz de riesgos y de calidad (Anexos 12 y 13):** Permitieron identificar y mitigar riesgos técnicos, financieros y regulatorios, así como establecer

criterios de calidad alineados con el RETIE 2024 y la NTC 2050:2019. Esta integración normativa fortalece la aplicabilidad del modelo en proyectos reales conectados a red en Colombia.

- **Aplicación de SCRUM (Anexo 14):** Mediante Sprints simulados permitió validar el modelo de gestión de forma incremental. Las revisiones y retrospectivas evidenciaron la capacidad del enfoque ágil para adaptarse a cambios regulatorios, tecnológicos o sociales, dando cumplimiento al objetivo específico 3, relacionado con la evaluación y verificación del modelo propuesto.

En términos generales, los resultados evidencian que la integración PMI–SCRUM constituye una estrategia viable para proyectos solares con sistemas de seguimiento en Colombia. Mientras PMI aporta control sobre alcance, costos, cronograma y riesgos, SCRUM facilita la adaptación a entornos dinámicos, característica clave en proyectos de energías renovables. Estos hallazgos son coherentes con enfoques reportados en la literatura internacional sobre gestión híbrida de proyectos y con el marco normativo colombiano vigente.

10. CONCLUSIONES

La presente monografía permitió diseñar y analizar teóricamente un modelo de gestión híbrido basado en las metodologías PMI y SCRUM, orientado a proyectos de energía solar fotovoltaica con sistemas de seguimiento en Colombia. Los resultados evidencian que la integración de enfoques predictivos y ágiles constituye una alternativa metodológica coherente para responder a la complejidad técnica, regulatoria y organizacional que caracteriza este tipo de proyectos.

En relación con el objetivo específico 1, el análisis de metodologías tradicionales y ágiles, apoyado en herramientas como el árbol de problemas y el árbol de objetivos, permitió identificar limitaciones recurrentes en la gestión de proyectos solares, particularmente en la planificación rígida, la gestión de riesgos regulatorios y la comunicación entre los actores involucrados. Este diagnóstico justificó la necesidad de un enfoque híbrido que supere las debilidades de los modelos exclusivamente tradicionales o ágiles.

Respecto al objetivo específico 2, la aplicación de los lineamientos del PMI en la fase de planificación demostró que herramientas como el acta de constitución, la EDT, el cronograma y las matrices de interesados, riesgos y presupuesto permiten estructurar de manera ordenada proyectos solares con sistemas de seguimiento, garantizando trazabilidad entre objetivos, actividades y entregables. Este enfoque contribuye a mejorar el control del alcance, el tiempo y los costos, aspectos críticos en proyectos de energías renovables.

En cuanto al objetivo específico 3, la incorporación de principios de SCRUM en la fase de ejecución y validación teórica del modelo evidenció una mayor capacidad de adaptación frente a cambios tecnológicos, regulatorios y del entorno. La utilización de Sprints simulados, revisiones y retrospectivas permitió validar de forma incremental los entregables del modelo de gestión, fortaleciendo la toma de decisiones y reduciendo la probabilidad de reprocesos en fases avanzadas del proyecto.

Desde el punto de vista normativo, el modelo propuesto demuestra coherencia con el marco legal colombiano vigente, integrando disposiciones clave como la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021, el RETIE 2024 y la NTC 2050:2019. Esta articulación normativa refuerza la aplicabilidad del modelo en proyectos solares conectados a red, garantizando condiciones de seguridad, calidad y cumplimiento regulatorio.

En términos generales, se concluye que el modelo de gestión híbrido PMI–SCRUM no solo es conceptualmente viable, sino que representa una herramienta útil para mejorar la gestión de proyectos solares con sistemas de seguimiento en Colombia, al aportar rigor metodológico, flexibilidad operativa y alineación con los objetivos de sostenibilidad y transición energética del país. Aunque el estudio tiene un alcance teórico–aplicativo y no incluye validación empírica mediante datos estadísticos, sienta una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el sector energético.

11. RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo teórico del modelo de gestión híbrido PMI–SCRUM y de los resultados obtenidos en la presente monografía, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas al ámbito académico, profesional y normativo:

Se recomienda que futuras investigaciones complementen el modelo propuesto mediante estudios de caso reales o proyectos piloto en plantas solares con sistemas de seguimiento, que permitan cuantificar indicadores como reducción de tiempos, control de costos, mejora en la gestión de riesgos y desempeño energético. La validación empírica fortalecería la aplicabilidad práctica del modelo y permitiría realizar comparaciones con enfoques tradicionales de gestión.

Para el sector académico, se sugiere profundizar en el análisis comparativo entre metodologías predictivas, ágiles e híbridas aplicadas a proyectos de energías renovables, incorporando técnicas formales de análisis como matrices comparativas, indicadores de desempeño (KPIs) y métodos de triangulación documental. Esto permitiría elevar el rigor investigativo y generar marcos de referencia más sólidos para la formación de ingenieros.

En el ámbito empresarial y de gestión de proyectos, se recomienda a las organizaciones interesadas en desarrollar proyectos solares con sistemas de seguimiento adoptar esquemas híbridos de gestión, utilizando el PMI como base para la planificación y el control, y SCRUM para las fases de desarrollo técnico, integración de sistemas y ajustes operativos. Esta combinación puede facilitar la adaptación a cambios regulatorios, tecnológicos y del mercado energético colombiano.

Desde la perspectiva normativa y regulatoria, se recomienda que los modelos de gestión de proyectos solares integren de manera explícita los requisitos del RETIE 2024, la NTC 2050:2019 y la regulación de conexión a red definida por la CREG, desde las fases iniciales de planificación. Esto contribuiría a reducir reprocesos,

retrasos y riesgos asociados al incumplimiento legal durante la ejecución de los proyectos.

Adicionalmente, se sugiere que futuros trabajos consideren variables geográficas, climáticas y socioeconómicas específicas de regiones como La Guajira, los Llanos Orientales o el norte del Cesar, con el fin de adaptar el modelo de gestión a contextos territoriales concretos y aumentar su pertinencia para la planificación regional de proyectos solares.

Finalmente, se recomienda explorar la incorporación de herramientas digitales de apoyo a la gestión de proyectos, tales como software de planificación, plataformas ágiles y sistemas de monitoreo de indicadores, que permitan fortalecer la trazabilidad, la comunicación entre interesados y la toma de decisiones en proyectos de energía solar con tecnologías de seguimiento.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Alkaff, S. A. A., Shamdasani, N. H., Go, Y. I., & Venkiteswaran, V. K. (2019). A study on implementation of PV tracking for sites proximate and away from the equator. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3, 375–382. <https://doi.org/10.1007/s41660-019-00086-7>
- Amadi, H. N. (2018). Design and performance evaluation of a dual-axis solar tracking system for rural applications [Gráfica comparativa de salida de potencia: fijo, un eje y doble eje]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 1235–1242.
- Castañeda, J., Ramírez, M., & Suárez, P. (2020). Optimización de la eficiencia fotovoltaica en techos urbanos mediante sistemas de seguimiento solar. *Revista Energía Renovable*, 15(2), 45–58.
- Congreso de la República de Colombia. (2001). Ley 697 de 2001: Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial No. 44.509*.
- Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. *Diario Oficial No. 49.150*.
- Congreso de la República de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético y la reactivación económica del país. *Diario Oficial No. 51.739*.
- Conforto, E. C., Rebentisch, E., & Amaral, D. C. (2016). Project management agility: The role of project management and technical uncertainty. *International Journal of Project Management*, 34(4), 660–674. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.01.007>
- Contraloría General de la República. (2024). Informe especial sobre la ejecución de proyectos de energías renovables en Colombia. Bogotá, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2019). Política de crecimiento verde. Departamento Nacional de Planeación, Gobierno de Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). La energía renovable en Colombia: resolver el trilema energético. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co>

- Fraunhofer ISE. (2022). Photovoltaics report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- García, D., Restrepo, C., & Vargas, J. (2020). Análisis técnico-económico de sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar en Colombia. *Revista Colombiana de Energía*, 18(2), 22–35.
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A power rating model for photovoltaic modules accounting for the spectral and angle-of-incidence effects. *Solar Energy*, 86(12), 2596–2606.
- ICONTEC. (2019). Norma Técnica Colombiana NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano. Sección 6-90. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, Colombia.
- IDAE. (2021). Guía práctica para el aprovechamiento de la energía solar. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Gobierno de España.
- IDEAM. (2024). Mapa de radiación solar de galería de mapas (datos abiertos) [Radiación solar promedio multianual]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado el 10 de septiembre de 2025, de <https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/maps-gallery/search-by-group/22258778>
- IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. <https://www.iea.org/>
- International Energy Agency (IEA). (2023). Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. International Energy Agency.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Wiley.
- Luque-Heredia, I., Vázquez, M., & García, M. (2021). Impact of dual-axis tracking on photovoltaic performance in equatorial regions. *Journal of Solar Energy Engineering*, 143(5), 051002.
- Méndez Gamboa, J., & Ríos Chávez, M. (2019). Energía solar fotovoltaica en América Latina: estado actual y perspectivas. *Revista Energía y Desarrollo*, 23(1), 15–29.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1073 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. Diario Oficial No. 49.523.
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE 2024. Bogotá, Colombia.

- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2 de abril de 2024: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Diario Oficial.
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). RETIE 2024: Actualizaciones y novedades. CIDET. Recuperado de <https://cidet.org.co/articulos/certificacion-de-productos/nuevo-reglamento-tecnico-de-instalaciones-electricas/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Requisitos de certificación de producto – paneles solares fotovoltaicos. QCert. Recuperado de <https://qcert.com.co/certificacion-retie-para-paneles-solares-fotovoltaico/>
- Molina, P., & Pérez, C. (2018). Climate variability and its effects on photovoltaic performance in Andean regions. *Renewable Energy Research*, 12(4), 88–105.
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1800–1818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.016>
- Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. París, Francia.
- Navarro, L., Fernández, R., & Ortega, J. (2022). Smart solar tracking: AI-based solutions for energy optimization. *Sustainable Technologies*, 19(3), 95–110.
- ONU. (2022). Informe sobre el progreso de los ODS: Energía asequible y no contaminante. Naciones Unidas.
- ONU. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- PV Magazine. (2025, febrero 10). Colombia sumó 1.625 MW de nueva capacidad fotovoltaica en 2024, entre centralizada y distribuida. PV Magazine Latam. <https://www.pv-magazine-latam.com>
- PMI. (2021). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition. Project Management Institute.
- Ramírez, J., & López, H. (2019). Evaluación comparativa de sistemas de seguimiento solar en Colombia. *Ingeniería Energética*, 25(1), 112–130.
- Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. NREL Technical Report.
- Rigby, D. K., Sutherland, J., & Takeuchi, H. (2016). Embracing agile. *Harvard Business Review*, 94(5), 40–50.

- Saqaff Alkaff, S., Abdullah, A., & Rahman, A. (2019). Design and development of solar tracking systems. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 225–231.
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide: The definitive guide to Scrum: The rules of the game*. Scrum.org. <https://scrumguides.org>
- Serrador, P., & Pinto, J. K. (2015). Does agile work? A quantitative analysis of agile project success. *International Journal of Project Management*, 33(5), 1040–1051. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.01.006>
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2025). *Energía solar y eólica y comunidades energéticas en Colombia*. SEI. <https://www.sei.org>
- UPME. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia [Mapa]*. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Impresos/Atlas_Radiacion_Solar_2005/0-Primera_Parte.pdf
- UPME. (2021). *Informe anual sobre el estado del sector energético colombiano*. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2022). *Plan energético nacional 2022–2050*. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía de Colombia.
- UPME. (2022). *Seguimiento a proyectos de generación con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)*. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá.
- Urbano, R., Durán, M., Rueda, J., & Jaimes, D. (2024). Estudio de un sistema de seguimiento solar de dos ejes en Bucaramanga para la mejora de la captación de irradiancia solar. *Revista Tecnológicas*, 27(1), 1–15. Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM). <https://doi.org/10.22430/22565337.3056>
- Visual-Paradigm. (2023). *PMBOK 6 process groups – Project process map template*. Visual-Paradigm. <https://online.visual-paradigm.com/>
- Visual-Paradigm. (2023). *Scrum sprint cycle in 8 steps*. Visual-Paradigm. <https://online.visual-paradigm.com/>
- Pixabay. (2015). *Solar energy photovoltaic panels [Fotografía]*. Pixabay. <https://pixabay.com/photos/solar-energy-photovoltaic-panels-868663/>
- Agencia Internacional de Energía. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. International Energy Agency.
- CONPES 4075. (2022). *Política de transición energética para Colombia*. Departamento Nacional de Planeación.

- Departamento Nacional de Planeación. (2019). Diagnóstico de gestión de proyectos de infraestructura en Colombia. DNP.
- García, J., Restrepo, D., & Vargas, L. (2020). Evaluación del rendimiento de seguidores solares en proyectos fotovoltaicos en Colombia. *Revista de Energías Renovables*.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2021). Plantas solares en España: Informe anual 2021. IDAE.
- International Energy Agency. (2023). Solar Energy Performance Report 2023. IEA.
- Kalogirou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Navarro, M., Pérez, A., & Torres, R. (2022). Validation of optimization models for solar tracking in mid-latitude regions. *Journal of Solar Energy Systems*.
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). Reporte oficial de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023. ONU.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). PMI.
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum guide: The definitive guide to Scrum*.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). Boletín estadístico de energía solar en Colombia. UPME.
- Urbano, L., Cárdenas, J., & Benavides, A. (2024). Impacto del seguimiento solar en zonas de alta radiación en Colombia. *Revista Colombiana de Energías Renovables*.

13. ANEXOS

ANEXO 1. ACTA DE CONSTITUCIÓN

Información del proyecto

Datos

Proyecto: SolarWalker

Fecha de emisión: 20/02/2025

Gerente de proyecto: Berny Alejandro Forero Vélez

Descripción del Proyecto

Se plantea diseñar un sistema de movimiento tipo rotatorio que cambia la inclinación y de giro que cambia la orientación en paneles solares para aumentar el tiempo de eficiencia de obtención de energía solar mediante el seguimiento continuo de luz solar permitiendo el máximo aprovechamiento de los rayos solares.

Esto aumentara el potencial eléctrico que puede ser recolectado durante el día permitiendo un mayor uso de energía renovable y así evitar el consumo de energías contaminantes y no renovables.

Propósito y justificación del proyecto

Mejorar la eficiencia de obtención de energía solar mediante un sistema con la capacidad de realizar un movimiento controlado de forma autónoma, esto permite mejor rendimiento energético durante un día recolección.

La energía solar es una gran fuente de energía renovable que tiene un menor impacto negativo a nivel ambiental y social. Con esto se toma en cuenta la incorporación de este tipo de sistema en paneles solares ya que es clave para maximizar la eficiencia energética y optimizar el retorno de inversión. Con esto a diferencia de los sistemas fotovoltaicos fijos los sistemas fotovoltaicos con seguimiento permiten que el panel se adapte en función a la trayectoria del sol, esto aumenta la captación de radiación solar.

Descripción del producto y entregables

El SolarWalker es un sistema de seguimiento Solar(Solar Tracker) diseñado para optimizar la captación de la radiación solar en instalaciones fotovoltaicas mediante el ajuste de la orientación de los paneles solares.

Este permite maximizar la eficiencia de producción energética al seguir el movimiento del sol a lo largo del día.

Entregables:

- Diseño del sistema de Seguimiento Solar
- Prototipo del sistema
- Software y control del sistema
- Infraestructura y montaje
- Pruebas y validación
- Documentación técnica y manuales
- Informe final del proyecto

Requerimientos de alto nivel

Requerimientos del producto

- **Requerimientos funcionales**
 - Seguimiento solar automático en dos ejes para maximizar la captación de energía.
 - Ajuste dinámico de orientación que basa en la posición del sol.
 - Sistema de sensores de luz para detección de la dirección de inclinación.
 - Modo de seguridad ante condiciones adversas.
 - Interfaz de monitoreo y control para ajustes manuales.
 - Integración con inversores y baterías para almacenamiento.
- **Requerimientos técnicos**
 - Estructura resistente para soportar condiciones climáticas adversas,
 - Actuadores de precisión con capacidad de ajuste a ángulos específicos
 - Software de control con algoritmo de seguimiento solar
 - Fuente de alimentación autónoma con respaldo
 - Sistema protección contra sobrecargas
- **Requerimientos operativos**
 - Rango de movimiento en 90 grados eje vertical y 360 eje horizontal
 - Resistencia a condiciones climáticas adversas
 - Bajo consumo energético
 - Mantenimiento mínimo

Requerimiento del proyecto

- **Requerimientos operativos**
 - Selección de un terreno adecuado.
 - Cronograma detallado con las fases del proyecto.
 - Coordinación con proveedores de materiales y equipos.
 - Capacitación de personal técnico para operación y mantenimiento.
 - Prueba de funcionamiento y operación.
- **Requerimientos de Recursos**
 - Equipo de trabajo con roles definidos.
 - Materiales y componentes.
 - Infraestructura para instalación.
 - Herramientas y equipos.
 - Plataforma de monitoreo.
- **Requerimientos normativos y de seguridad**
 - Cumplimiento de normativas eléctrica y ambientales
 - Certificaciones de seguridad en instalación y operación del sistema
 - Evaluaciones de impacto ambiental
 - Aplicación de medidas de seguridad de prevención de accidentes laborales
 - Asegurar la compatibilidad del sistema con la infraestructura energética existentes.

Objetivos

Alcance

El proyecto consiste en el diseño, desarrollo e implementación de un Sistema de Seguimiento Solar (Solar Tracker) para mejorar la eficiencia energética en una planta fotovoltaica. El sistema permitirá que los paneles solares ajusten su orientación automáticamente en función de la posición del sol, maximizando la captación de radiación solar y aumentando la producción de energía eléctrica.

El proyecto abarca desde la fase de diseño hasta la instalación y pruebas operativas, asegurando que el sistema cumpla con los estándares técnicos, de calidad y seguridad.

Supuestos

- Disponibilidad de Tecnología y Materiales: Se asume que los motores, sensores, estructuras y componentes electrónicos estarán disponibles en el mercado local o internacional sin demoras significativas.
- Condiciones Climáticas Adecuadas: Se prevé que las condiciones ambientales del sitio de instalación sean óptimas para la operación eficiente del sistema sin interferencias extremas (tormentas, vientos fuertes, etc.).
- Cumplimiento de Normativas: Se asume que el proyecto cumple con las regulaciones ambientales, eléctricas y de seguridad vigentes en Colombia sin necesidad de permisos adicionales especiales.
- Eficiencia Energética: Se espera que el sistema de seguimiento incremente la producción de energía solar en al menos un 20-30% en comparación con paneles estáticos.

- Disponibilidad de Recursos Humanos: Se contará con personal calificado para el diseño, instalación y mantenimiento del sistema sin dificultades en la contratación.
- Accesibilidad del Sitio de Instalación: Se asume que el área destinada a la implementación es accesible para el transporte y montaje de los equipos.
- Aprobación del Presupuesto: Se considera que los fondos necesarios estarán disponibles dentro del tiempo planificado y sin restricciones presupuestarias inesperadas.
- Funcionamiento del Software de Control: Se espera que el software de monitoreo y ajuste automático de los paneles funcione correctamente con los sensores y actuadores seleccionados.
- Durabilidad del Sistema: Se asume que el sistema tendrá una vida útil de al menos 15 años con mantenimiento periódico.

Restricciones

- Presupuesto Limitado: El proyecto debe ejecutarse dentro del presupuesto estimado de \$370.000.000 COP, sin sobrecostos imprevistos.
- Tiempo de Ejecución: El proyecto debe completarse en un máximo de 33 semanas desde su aprobación.
- Normativas y Regulaciones: Debe cumplir con la normatividad eléctrica, ambiental y de seguridad vigente en Colombia, incluyendo la Resolución CREG 030 de 2018 sobre autogeneración de energía.
- Espacio Físico Disponible: La instalación del sistema debe ajustarse a las dimensiones del área asignada, sin posibilidad de expansión.
- Capacidad Energética del Sistema: El diseño debe estar optimizado para la capacidad de los paneles solares ya existentes o nuevos, sin modificar la infraestructura eléctrica principal.

- Disponibilidad de Proveedores: La adquisición de materiales y componentes dependerá de los tiempos de entrega de los proveedores locales e internacionales.
- Condiciones Meteorológicas: Fenómenos extremos como tormentas, huracanes o periodos prolongados de nubosidad podrían afectar la eficiencia del sistema.
- Mantenimiento Periódico: Se requiere una estrategia de mantenimiento programado para evitar fallas y asegurar la operatividad del sistema a largo plazo.
- Interoperabilidad: El sistema debe ser compatible con las instalaciones solares actuales sin necesidad de cambios estructurales adicionales.
- Capacitación del Personal: El equipo operativo debe recibir capacitación para garantizar el correcto uso y mantenimiento del sistema.

Riesgos iniciales del sistema

Riesgos técnicos y de implementación

- ❖ Fallos en el diseño del sistema.
- ❖ Incompatibilidad con infraestructura existente.
- ❖ Baja precisión del seguimiento solar.

Riesgos económicos y financieros

- ❖ Incremento de costos materiales.
- ❖ Retraso en la liberación del presupuesto.

Riesgos operacionales y de recursos

- ❖ Falta de personal capacitado.
- ❖ Problemas logísticos en instalación.

Riesgos Ambientales y externos

- ❖ Condiciones climáticas extremas.
- ❖ Cambios en regulaciones o normativas.

Cronograma

Fase	Actividades principales	Duración
1.Inicio del proyecto	- Elaboración del acta de Constitución del proyecto. - Identificación de requisitos y alcance del sistema.	2 semanas
2.Diseño y planificación	- Diseño mecánico y estructural del sistema de seguimiento. - Diseño eléctrico y electrónico. - Desarrollo del software de control. - Evaluación de costos y adquisición de materiales.	10 semanas
3.Fabricacion e instalación	- Fabricación y ensamblaje de la estructura. - Instalación de sensores, motores y sistema de control. - Integración con los paneles solares existentes.	9 semanas
4.Pruebas y validación	- Pruebas de funcionamiento del sistema de seguimiento. - Ajustes y optimización de eficiencia.	6 semanas
5.Capacitacion y cierre	- Capacitación del personal técnico. - Documentación final del proyecto. - Evaluación de desempeño y entrega final.	6 semanas
**Duración total		33 semanas

Presupuesto inicial

Concepto	Costo estimado (COP)
Diseño e ingeniería	\$40.000.000
Materiales y componentes	
- Estructura metálica	\$60.000.000
- Motores y actuadores	\$32.000.000
- Sensores de luz y climatológicos	\$20.000.000
- Microcontrolador y sistema de control	\$28.000.000
Fabricación y ensamblaje	\$48.000.000
Instalación	\$40.000.000
Software de control	\$24.000.000
Pruebas y validación	\$20.000.000
Capacitación del personal	\$16.000.000
Documentación y gestión	\$12.000.000
Imprevistos	\$30.000.000
○ <i>Costo total aproximado</i>	\$370.000.000

Requisitos de aprobación

1. Cumplimiento del alcance definido
2. Aumento de la eficiencia de energética
3. Entrega dentro del presupuesto asignado
4. Finalización en el plazo establecido
5. Cumplimiento normativo y legal
6. Pruebas y validación exitosa
7. Capacitación del personal
8. Documentación completa del proyecto

Criterios de cierre y cancelación

Cierre

- 1) Finalización del alcance definido
- 2) Cumplimiento del presupuesto y cronograma
- 3) Mejora de eficiencia energética
- 4) Aprobación de pruebas y validación
- 5) Capacitación del personal y entrega de documentación
- 6) Cumplimiento normativo y de seguridad

Cancelación

- 1) Falta de viabilidad técnica o financiera
- 2) Retrasos críticos en la ejecución
- 3) Incumplimiento de normativas o regulaciones
- 4) Bajo desempeño del sistema
- 5) Retiro del financiamiento o falta de recursos
- 6) Factores externos incontrolables

ANEXO 2. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DEL TRABAJO (EDT)

1. Sistema de seguimiento solar

1.1. Gestión del proyecto

1.1.1. Definición del proyecto

- 1.1.1.1. Definición del alcance
- 1.1.1.2. Identificación de objetivos
- 1.1.1.3. Análisis de viabilidad

1.1.2. Planificación del proyecto

- 1.1.2.1. Elaboración del acta de constitución
- 1.1.2.2. Definición de recursos
- 1.1.2.3. Análisis de riesgos

1.2. Diseño y desarrollo del sistema

1.2.1. Diseño Mecánico

- 1.2.1.1. Estructura de soporte
- 1.2.1.2. Componentes de movimiento

1.2.2. Diseño electrónico

- 1.2.2.1. Sensores y Actuadores
- 1.2.2.2. Placa de control y comunicaciones

1.2.3. Desarrollo de software

- 1.2.3.1. Programación del sistema de control
- 1.2.3.2. Interfaz de Monitoreo

1.3. Adquisición y ensamblaje

1.3.1. Compra de materiales

- 1.3.1.1. Selección de proveedores
- 1.3.1.2. Adquisición de componentes

1.3.2. Fabricación del sistema

- 1.3.2.1. Corte y ensamblaje de estructura
- 1.3.2.2. Instalación de sensores y motores

1.4. Pruebas y Validación

1.4.1. Pruebas mecánicas

- 1.4.1.1. Resistencia estructural
- 1.4.1.2. Durabilidad de componentes

1.4.2. Pruebas electrónicas

- 1.4.2.1. Calibración de sensores
- 1.4.2.2. Prueba de software y control

1.5. Implementación y entrega

1.5.1. Instalación en sitio

- 1.5.1.1. Montaje de la estructura
- 1.5.1.2. Conexión del sistema de control

1.5.2. Capacitación y documentación

- 1.5.2.1. Manual de usuario
- 1.5.2.2. Entrenamiento del personal

1.6. Cierre del proyecto

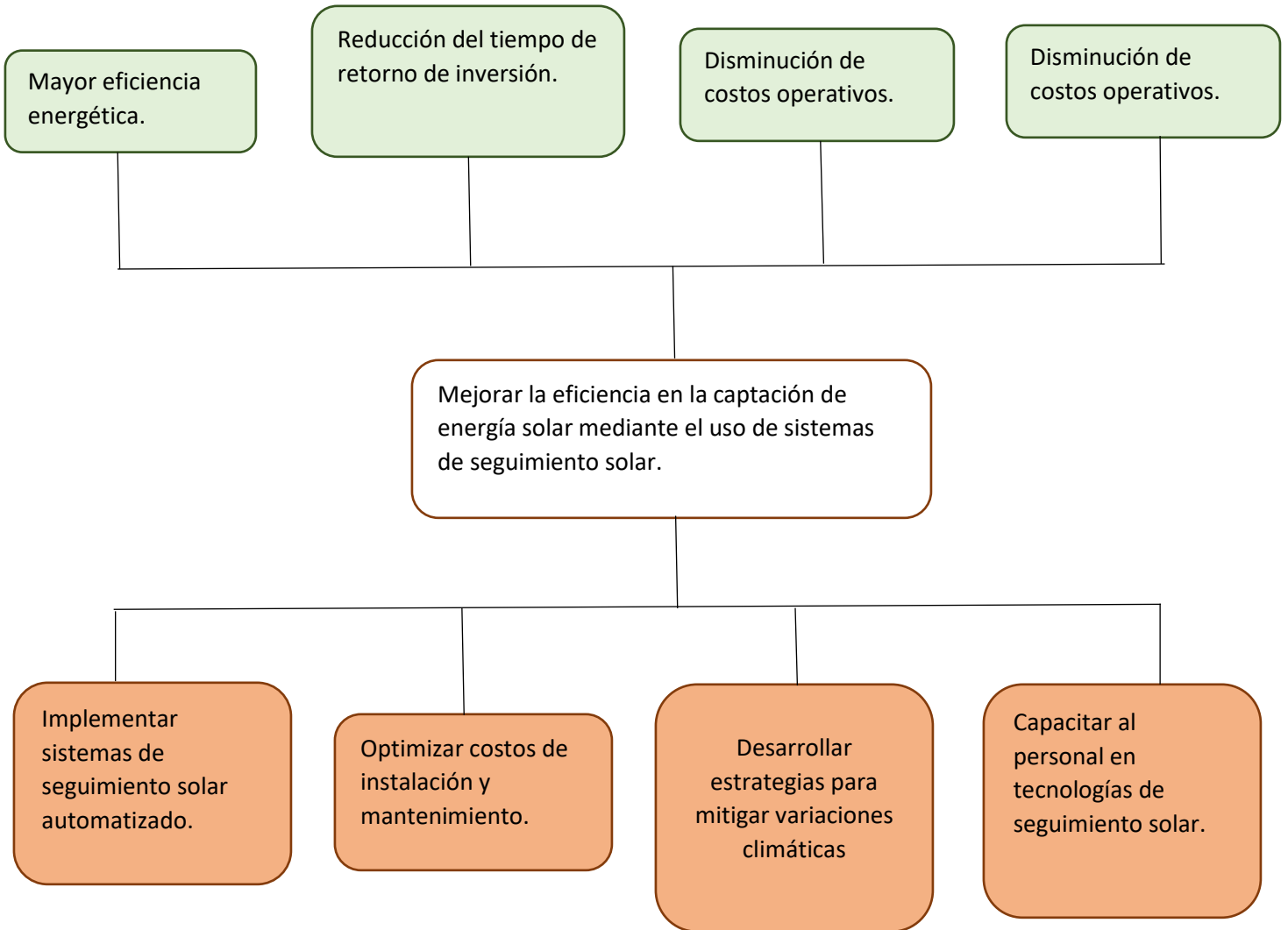
1.6.1. Revisión Final

- 1.6.1.1. Evaluación de resultados
- 1.6.1.2. Optimización final

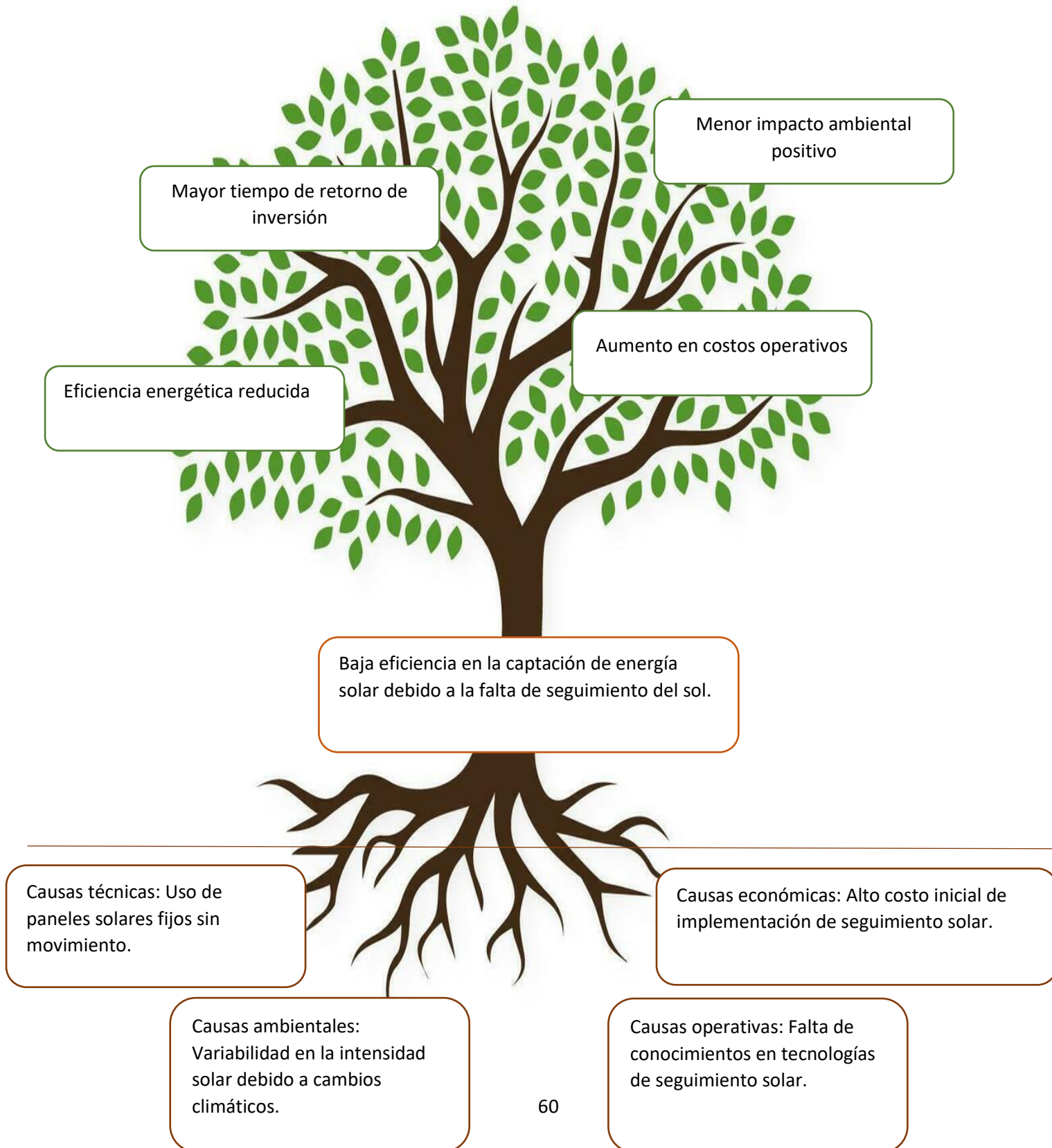
1.6.2. Entrega oficial

- 1.6.2.1. Transferencia del sistema
- 1.6.2.2. Cierre administrativo

ANEXO 3. ÁRBOL DE OBJETIVOS



ANEXO 4. ÁRBOL DEL PROBLEMA



ANEXO 5. MATRIZ DE COMUNICACIÓN

Interesado	Identificación	Quien comunica	Cuando lo comunica	A quien se comunica	Como lo comunica	Comunicación
Gerente del proyecto	Avance general del proyecto	Gerente del proyecto	Semanal	Equipo del proyecto	Presencial/virtual	Interno
Equipo técnico	Estado de diseño y desarrollo	PMO/Líder técnico	Mensual	Gerente del proyecto	Documento	Interno
Proveedores	Estado de entrega de insumos	Líder logístico	Según necesidad	Ingenieros de instalación	Correo/reunión	Externo
Gobierno y reguladores	Cumplimiento normativo	Gerente del proyecto	Trimestral	Entidades reguladoras	Documento oficial	Externo
Comunidades locales	Impacto del proyecto y beneficios	Responsable RSE	Bimestral	Habitantes y líderes locales	Eventos y encuestas	Externo
Inversionistas	Estado financiero y rentabilidad	Área financiera	Trimestral	Junta de inversionistas	Documento/Presentación	Externo
Usuarios finales	Información sobre acceso a la energía	Responsable de comunicación	Semestral	Población beneficiaria	Folletos/Redes sociales	Externo
Ingenieros de instalación	Progreso de instalación	Líder de instalación	Diario	Equipo técnico	Reporte digital	Interno
Empresas de transporte	Logística y estado de transporte	Líder logístico	Según necesidad	Proveedores y líder de instalación	Plataforma digital	Externo
Equipo financiero	Presupuesto y costos	Gerente financiero	Trimestral	Gerente del proyecto	Documento/reunión	Externo

Organizaciones ambientales	Impacto ecológico y medidas	Responsable de sostenibilidad	Semestral	Organismos ambientales	Informe/reuniones	Externo
Líderes comunitarios	Información del avance del proyecto	Responsable RSE	Trimestral	Comunidad local	Reunión presencial	Externo
Autoridades municipales	Estado de permisos y regulaciones	Líder de permisos	Según necesidad	Gobierno Local	Reunión presencial	Externo
Operador de red	Requisitos técnicos para la conexión del sistema fotovoltaico a la red, evaluación de la solicitud de conexión y aprobación o ajustes necesarios.	Ingeniero de conexión o área técnica del operador de red.	Según necesidad	Gerente del proyecto / Ingeniero responsable del diseño eléctrico	Correo electrónico y plataforma de trámites del operador de red	Externo
Organismo de inspección RETIE	Resultados de la inspección eléctrica y certificación de cumplimiento de las normas de seguridad eléctrica aplicables.	Inspector eléctrico certificado / Ingeniero inspector.	Trimestral/Según inspección	Ingeniero eléctrico del proyecto / Gerente del proyecto	Informe técnico y certificación de inspección	Externo
Operador del sistema de medición	Especificaciones y validación del sistema de medición bidireccional para registrar la energía generada e inyectada a la red.	Ingeniero de medición o especialista en sistemas de medición.	Según necesidad	Ingeniero eléctrico del proyecto / Responsable de integración del sistema	Reporte técnico y correo electrónico	Externo

ANEXO 6. MATRIZ DE INTERESADOS

Interesado	Roles	Interés	Conocimiento	Estrategia de gestión
Gerente del proyecto	Dirección y supervisión general	Asegurar la correcta ejecución del proyecto	Alto	Comunicación constante y reuniones periódicas
Equipo técnico	Diseño e implementación del sistema	Desarrollo eficiente del sistema	Alto	Reuniones técnicas semanales, informes de progreso
Proveedores	Suministro de materiales y equipo	Cumplimiento de contratos y pagos	Medio	Coordinación logística y reporte de entrega
Gobierno y reguladores	Normativa y permisos	Cumplimiento de normativas	Medio	Cumplimiento de normativas y reporte oficiales
Comunidades locales	Afectados por la instalación	Minimizar impacto ambiental y social	Bajo	Divulgación de beneficios y consultas públicas
Inversionistas	Financiación del proyecto	Rentabilidad y cumplimiento de los objetivos	Medio	Reportes financieros y reuniones trimestrales
Usuarios Finales	Beneficiario de la energía	Acceso a energía confiable y asequible	Bajo	Material informativo y encuestas de satisfacción
Ingenieros de instalación	Montaje y pruebas del sistema	Instalación adecuada del sistema	Medio	Capacitación y reportes diarios

Empresas de transporte	Logística y entrega de equipos	Entregar los equipos en tiempo y forma	Bajo	Seguimiento y planificación de entregas
Equipo financiero	Gestión de recursos económicos	Control de costos y presupuestos	Medio	Informes financieros y reuniones
Organizaciones ambientales	Supervisión del impacto ecológico	Minimizar impacto ambiental	Alto	Informes de sostenibilidad y consultas
Líderes comunitarios	Representación de la comunidad	Garantizar los beneficios para la comunidad	Medio	Reuniones de socialización y atención de inquietudes
Autoridades municipales	Aprobaciones locales	Regular impacto y permisos locales	Medio	Gestión de permisos y coordinación
Operador de red	Evaluación técnica y aprobación de conexión	Evaluar y aprobar la conexión del sistema fotovoltaico a la red eléctrica.	Alto	Gestión de trámites de conexión y coordinación técnica para aprobación del proyecto.
Organismo de inspección RETIE	Certificación de seguridad eléctrica	Verificar el cumplimiento de las normas de seguridad eléctrica de la instalación.	Alto	Coordinación de inspecciones y gestión del proceso de certificación eléctrica.

Operador del sistema de medición	Validación del sistema de medición bidireccional	Validar el sistema de medición bidireccional de la energía generada e inyectada a la red.	Alto	Coordinación para instalación, verificación y habilitación del sistema de medición.
----------------------------------	--	---	------	---

ANEXO 7. MATRIZ DE PODER

Interesado	Nivel de poder	Nivel de interés	Estrategia
Gerente del proyecto	Alto	Alto	Gestionar de cerca
Equipo técnico	Medio	Alto	Mantener informado
Proveedores	Medio	Medio	Supervisar y coordinar
Gobierno y reguladores	Alto	Bajo	Mantener satisfecho
Comunidades locales	Bajo	Medio	Mantener informado
Inversionistas	Alto	Alto	Gestionar de cerca
Usuarios Finales	Bajo	Medio	Mantener informado
Ingenieros de instalación	Medio	Alto	Mantener informado
Empresas de transporte	Bajo	Medio	Mantener informado
Equipo financiero	Medio	Medio	Mantener informado
Organizaciones ambientales	Alto	Medio	Mantener satisfecho
Líderes comunitarios	Medio	Alto	Mantener satisfecho
Autoridades municipales	Alto	Medio	Mantener satisfecho
Operador de red	Alto	Alto	Gestionar de cerca
Organismo de inspección RETIE	Alto	Medio	Mantener satisfecho
Operador del sistema de medición	Medio	Medio	Mantener informado

ANEXO 8. MATRIZ DE MARCO LÓGICO

JERARQUÍA DE OBJETIVOS	INDICADOR	FUENTES DE VERIFICACIÓN	SUPUESTOS	
FIN (OBJETIVO A LARGO PLAZO):				
Aumentar la eficiencia y sostenibilidad en la generación de energía renovable mediante la implementación de sistemas de seguimiento solar, contribuyendo a la transición energética y la reducción de emisiones de carbono.	Porcentaje de mejora en la eficiencia de captación solar. Reducción de emisiones de CO ₂ en la zona de implementación. Porcentaje de reducción en costos de generación de energía.	Informes de producción energética. Reportes ambientales. Análisis de costos de generación.	Políticas gubernamentales de apoyo a energías renovables. Demanda sostenida de energía limpia. Disponibilidad de financiamiento a largo plazo.	
OBJETIVO GENERAL / PROPÓSITO:				
Implementar un sistema de seguimiento solar para optimizar la captación de energía y mejorar la eficiencia de los paneles solares, reduciendo costos y maximizando la generación de energía renovable.	Cantidad de sistemas de seguimiento solar instalados y operativos. Porcentaje de aumento en la generación de energía solar en comparación con sistemas fijos. Nivel de satisfacción de usuarios finales y operadores.	Registros de instalación. Reportes técnicos de rendimiento. Encuestas de percepción de usuarios y operadores	Factibilidad técnica del sistema. Aceptación del sistema por parte de comunidades y empresas. Condiciones climáticas favorables para la generación solar.	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS (COMPONENTES O RESULTADOS):				
1	Diseñar y planificar el sistema de seguimiento solar, asegurando su viabilidad técnica, económica y regulatoria.	Instalación y operación del sistema de seguimiento solar - Porcentaje de instalación completada en el tiempo planificado	Reportes de avance del proyecto	Disponibilidad de equipos y tecnología adecuada.
2	Adquirir e instalar los equipos necesarios para la implementación del sistema de seguimiento solar.	Capacitación del personal técnico y Número de técnicos capacitados	Registros de capacitación	Acceso a financiamiento para la implementación
3	Desarrollar e implementar un sistema de monitoreo y control para optimizar la eficiencia del seguimiento solar.	Optimización de costos de mantenimiento y Porcentaje de reducción en costos operativos	Informes de costos operativos	Compromiso de las autoridades para permisos y regulaciones
ACTIVIDADES:				
1.1	Diseño y planificación del sistema de seguimiento solar	Selección de tecnología de seguimiento solar	Contratos de compra	Disponibilidad de proveedores confiables.
1.2	Adquisición e instalación de equipos del sistema de seguimiento solar	Adquisición de equipos	Registros de instalación	Cumplimiento de regulaciones locales.
1.3	Desarrollo e implementación del sistema de monitoreo y control	Instalación y configuración del sistema	Informes de capacitación	Personal capacitado disponible
1.4	Pruebas, puesta en marcha y optimización del sistema	Capacitación del personal	Reportes de rendimiento	
		Monitoreo y optimización del rendimiento del sistema	Estudios ambientales	
		Evaluación del impacto ambiental		

ANEXO 9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

NOMBRE DE PROYECTO: Sistema de seguimiento solar (solartacker) para sistemas fotovoltaicos																																	Normativa aplicada		
	Semanas																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
1. Inicio del proyecto	■	■																																	
1.1 Elaboración del acta de constitución del proyecto	■																																		
1.2 Identificación de requisitos y alcance del sistema.		■																																	
2. Diseño y planificación			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
2.1 Diseño mecánico y estructural del sistema de seguimiento.			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Análisis regulatorio del proyecto (CREG 030).
2.2 Diseño eléctrico y electrónico.							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
2.3 Desarrollo del software de control.										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Verificación de requisitos RETIE
2.4 Evaluación de costos y adquisición de materiales.																																			
3. Fabricación e instalación																																			
3.1 Fabricación y ensamble de la estructura.																																			
3.2 Instalación de sensores, motores y sistema de control.																																			Solicitud de conexión operador de red (CREG 174)
3.3 Integración con los paneles solares existentes.																																			
4. Pruebas de funcionamiento del sistema de seguimiento.																																			
4.1 Pruebas de funcionamiento del sistema de seguimiento.																																			
4.2 Ajustes y optimización de eficiencia.																																			
5. Capacitación y cierre																																			
5.1 Capacitación del personal técnico.																																			
5.2 Documentación final del proyecto.																																			Validación de cumplimiento normativo
5.3 Evaluación de desempeño y entrega final.																																			

ANEXO 10. MATRIZ DE PONDERACIÓN

DESCRIPCION	Pond. semanas	Pond. Total %
	33	100
COMPONENTE 1: Gestión del proyecto	5	15,15
Actividad 1.1: Definición del proyecto	2	6,06
Actividad 1.2: Planificación del proyecto	3	9,09
COMPONENTE 2: Diseño y desarrollo del sistema	9	27,27
Actividad 2.1: Diseño Mecánico	3	9,09
Actividad 2.2: Diseño electrónico	3	9,09
Actividad 2.3: Desarrollo de software	3	9,09
COMPONENTE 3: Adquisición y ensamblaje	6	18,18
Actividad 3.1: Compra de materiales	3	9,09
Actividad 3.2: Fabricación del sistema	3	9,09
COMPONENTE 4: Pruebas y validación	5	15,16
Actividad 4.1: Pruebas mecánicas	2,5	7,58
Actividad 4.2: Pruebas electrónicas	2,5	7,58
COMPONENTE 5: Implementación y entrega	4	12,12
Actividad 5.1: Instalación en sitio	2	6,06
Actividad 5.2: Capacitación y documentación	2	6,06
COMPONENTE 6: Cierre del proyecto	4	12,12
Actividad 5.1: Revisión final	2	6,06
Actividad 5.2: Entrega oficial	2	6,06

ANEXO 11. MATRIZ DE PRESUPUESTO

Concepto	Subconcepto	Actividad	Costo estimado (COP)	
Diseño e ingeniería	Estudios preliminares	Análisis de requerimientos	\$ 5.000.000	
		Evaluación de viabilidad técnica	\$ 5.000.000	
	Diseño mecánico y estructural	Modelado 3D de la estructura	\$ 7.000.000	
		Simulación de resistencia mecánica	\$ 8.000.000	
	Diseño electrónico y de control	Selección de componentes electrónicos	\$ 5.000.000	
		Diseño de circuitos	\$ 6.000.000	
		Programación inicial de control	\$ 4.000.000	
		Integración de hardware y software	\$ 5.000.000	
	Materiales y componentes	Estructura metálica	Compra de perfiles y láminas metálicas	\$ 30.000.000
			Corte y preparación de materiales	\$ 10.000.000
Tratamiento anticorrosivo			\$ 20.000.000	
Motores y actuadores		Selección y compra de motores	\$ 18.000.000	
		Pruebas de torque y resistencia	\$ 7.000.000	
		Instalación de motores	\$ 7.000.000	
Sensores de luz y climatológicos		Compra de sensores de radiación solar	\$ 10.000.000	
		Pruebas de sensibilidad	\$ 5.000.000	
		Instalación y calibración	\$ 5.000.000	
Microcontrolador y sistema de control		Adquisición de microcontroladores	\$ 15.000.000	
		Desarrollo de firmware	\$ 8.000.000	

		Configuración de comunicación inalámbrica	\$ 5.000.000
Fabricación y ensamblaje	Manufactura de piezas metálicas	Corte y soldadura	\$ 12.000.000
		Ensamblaje de estructura	\$ 8.000.000
		Aplicación de recubrimientos protectores	\$ 5.000.000
		Ensamblaje de componentes electrónicos	Soldadura de circuitos
	Montaje de sensores		\$ 5.000.000
	Pruebas internas de ensamblaje	Evaluación de conexiones eléctricas	\$ 6.000.000
		Ajuste mecánico de la estructura	\$ 7.000.000
	Instalación	Transporte de materiales	Logística de traslado
Seguro y embalaje			\$ 5.000.000
Montaje de estructura		Anclaje y fijación en sitio	\$ 8.000.000
		Ensamblaje final en campo	\$ 10.000.000
Conexión y configuración electrónica		Instalación de cableado	\$ 5.000.000
		Integración con el sistema de control	\$ 5.000.000
Software de control	Desarrollo del código	Programación del algoritmo de seguimiento	\$ 10.000.000
		Implementación de interfaz de usuario	\$ 5.000.000
	Integración con hardware	Pruebas de comunicación con sensores	\$ 3.000.000
		Configuración de parámetros del sistema	\$ 2.000.000
	Pruebas de software	Simulación de funcionamiento	\$ 2.000.000
		Ajustes y optimización	\$ 2.000.000

Pruebas y validación	Pruebas mecánicas	Evaluación de resistencia estructural	\$ 5.000.000
		Simulación de carga de viento	\$ 5.000.000
	Pruebas electrónicas	Pruebas de calibración de sensores	\$ 3.000.000
		Verificación de señales eléctricas	\$ 3.000.000
	Ajustes y optimización final	Corrección de fallos en software	\$ 2.000.000
		Ajustes mecánicos	\$ 2.000.000
Capacitación del personal	Elaboración de manuales	Redacción de guías de usuario	\$ 2.000.000
		Creación de materiales didácticos	\$ 3.000.000
	Capacitación teórica	Sesiones de formación en operación	\$ 3.000.000
		Evaluación de conocimientos	\$ 3.000.000
	Capacitación práctica	Entrenamiento en campo	\$ 3.000.000
		Simulación de fallos y resolución	\$ 2.000.000
Documentación y gestión	Redacción de informes técnicos	Informe de diseño e ingeniería	\$ 2.000.000
		Reportes de pruebas y validación	\$ 3.000.000
	Gestión de normativas y permisos	Licencias y certificaciones	\$ 4.000.000
		Inspecciones y auditorías	\$ 3.000.000
Imprevistos	Reserva para ajustes y cambios	Fondos para modificaciones inesperadas	\$ 30.000.000
Costo total aproximado			\$ 370.000.000

ANEXO 12. MATRIZ DE RIESGO

MATRIZ DE RIESGOS								
ID	Categoría	Descripción del riesgo	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo	Respuesta / Estrategia	Normativa asociada	Responsable
R1	Técnico	Falla en el diseño del sistema (baja precisión del seguimiento solar).	Media	Alto	Alto	Mitigar: pruebas de prototipo y validación temprana.	RETIE - Resolución 40117 de 2024	Equipo de diseño
R2	Técnico	Incompatibilidad con infraestructura existente.	Baja	Medio	Medio	Mitigar: revisión técnica previa e integración gradual.	NTC 2050:2019	Líder de integración
R3	Financiero	Incremento de costos de materiales.	Alta	Alto	Alto	Transferir: contratos con proveedores con precios fijos.	Buenas practicas de PMI	Gerente de proyecto
R4	Financiero	Retraso en la liberación del presupuesto.	Media	Alto	Alto	Evitar: gestionar aprobación temprana del presupuesto.	PMI - Gestión de costos	Comité financiero
R5	Operacional	Falta de personal capacitado.	Media	Medio	Medio	Mitigar: plan de capacitación y manuales técnicos.	RETIE - requisitos de operación segura	Líder de operaciones
R6	Logístico	Retrasos en la entrega de equipos.	Alta	Medio	Alto	Mitigar: múltiples proveedores y compras anticipadas.	RETIE - certificación de equipos FV	Jefe de compras
R7	Ambiental	Condiciones climáticas extremas (tormentas, vientos fuertes).	Media	Alto	Alto	Aceptar: plan de contingencia y protocolos de	RETIE - Resolución 40117	Responsable de seguridad
R8	Normativo	Cambios en regulaciones o permisos.	Baja	Alto	Medio	Mitigar: monitoreo regulatorio y asesoría legal.	CREG 174 de 2021	Gerente de proyecto
R9	Operacional	Mantenimiento insuficiente → fallas en operación.	Media	Medio	Medio	Mitigar: cronograma de mantenimiento preventivo.	NTC 2050 - mantenimiento de instalaciones	Coordinador de mantenimiento
R10	Seguridad	Accidentes laborales durante instalación.	Media	Alto	Alto	Evitar: EPP obligatorio, capacitaciones en seguridad.	RETIE + normativa de seguridad industrial	Responsable HSE

ANEXO 13. MATRIZ DE CALIDAD

Entregable	Criterio de calidad / Estándar	Métrica de verificación	Método de control	Responsable
Diseño del sistema de seguimiento solar	Cumplimiento de especificaciones técnicas del proyecto	Diseño aprobado y documentado	Revisión técnica del diseño	Equipo de diseño
Prototipo del seguidor solar	Funcionamiento correcto del sistema de seguimiento	Error de seguimiento $\leq 5^\circ$	Pruebas de funcionamiento	Equipo de pruebas
Software de control del sistema	Operación estable y respuesta correcta del algoritmo	Tiempo de respuesta del sistema < 2 s	Pruebas de software y simulación	Equipo de software
Instalación del sistema	Cumplimiento de normas eléctricas y de seguridad	Certificación de instalación conforme	Inspección técnica	Responsable de instalación
Sistema fotovoltaico operativo	Generación energética acorde al diseño	Producción energética dentro del 90–100% esperado	Monitoreo del sistema	Gerente técnico
Capacitación de personal	Transferencia efectiva del conocimiento	Personal capacitado y evaluación aprobada	Sesiones de capacitación y evaluación	Líder de capacitación
Entrega del proyecto	Cumplimiento de alcance, tiempo y calidad establecidos.	Acta de cierre aprobada	Revisión final del proyecto	Gerente de proyecto

ANEXO 14. SCRUM

Estructura de Sprints del proyecto

Sprint 1 – Diseño inicial del sistema

Duración: 1 semana

Actividades:

Elaboración de los diseños iniciales del sistema de seguimiento solar.

Definición de especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico.

Entregables:

Documento de diseño preliminar.

Especificaciones técnicas del sistema.

Sprint 2 – Selección de materiales y desarrollo técnico

Duración: 1 semana

Actividades:

Selección de materiales y componentes del sistema.

Inicio de implementación del diseño del seguidor solar.

Entregables:

Lista de materiales y componentes.

Diseño técnico actualizado.

Sprint 3 – Implementación y pruebas del sistema

Duración: 1 semana

Actividades:

Desarrollo del sistema de control.

Pruebas iniciales de funcionamiento del diseño.

Entregables:

Prototipo funcional del sistema.

Informe de pruebas de funcionamiento.

Sprint 4 – Gestión de riesgos y validación técnica

Duración: 1 semana

Actividades:

Identificación y mitigación de riesgos técnicos.

Revisión del cumplimiento de requisitos técnicos del sistema.

Entregables:

Informe de análisis de riesgos.

Validación técnica del diseño.

Fase de instalación del sistema

Sprint 5 – Diseño eléctrico y electrónico

Duración: 2 semanas

Actividades:

Desarrollo de los diseños eléctricos y electrónicos del sistema.

Preparación de la integración del sistema fotovoltaico.

Entregables:

Diagramas eléctricos del sistema.

Documentación técnica de integración.

Sprint 6 – Desarrollo de software e integración

Duración: 1 semana

Actividades:

Desarrollo del software de control del sistema.

Integración del software con el hardware del sistema.

Entregables:

Software de control del seguidor solar.

Informe de integración hardware–software.

Sprint 7 – Montaje del sistema

Duración: 1 semana

Actividades:

Montaje del sistema general.

Verificación del funcionamiento del sistema completo.

Entregables:

Sistema montado.

Informe de pruebas del sistema.

Reuniones SCRUM

Durante la ejecución del proyecto se realizan los siguientes tipos de reuniones:

Daily Scrum:

Reuniones diarias del equipo técnico para evaluar avances y resolver problemas.

Sprint Review:

Reuniones al final de cada Sprint para presentar los entregables obtenidos.

Sprint Planning:

Reuniones de planificación para definir las tareas del siguiente Sprint.