

Definición y conceptualización de una metodología que contribuya a mejorar la eficiencia y efectividad en la ejecución de proyectos fotovoltaicos de gran escala

Marxin Alexander Medrano Ortiz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia “UNAD”

Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios – ECACEN

Especialización en Gestión de Proyectos

Florencia, Caquetá.

Mayo de 2025

Resumen

El presente trabajo de grado identifica y conceptualiza una metodología integral para la gestión eficiente de proyectos fotovoltaicos de gran escala, abordando los principales desafíos técnicos, económicos, financieros, regulatorios y ambientales que enfrenta la industria solar. Se realiza una revisión de los fundamentos teóricos de la energía fotovoltaica, su evolución y aplicaciones, así como un análisis de casos y benchmarking de metodologías internacionales. La propuesta metodológica integra herramientas de planificación estratégica, modelos de financiamiento innovadores, prácticas de optimización de costos y criterios de sostenibilidad, con el objetivo de maximizar la viabilidad, eficiencia y rentabilidad de los proyectos solares. Los resultados evidencian que la aplicación de esta metodología contribuye a la reducción de riesgos, mejora la integración a la red eléctrica y favorece la transición energética sostenible.

Palabras clave: energía fotovoltaica, gestión de proyectos, gran escala, sostenibilidad, optimización de costos.

Abstract

This thesis develops a comprehensive methodology for the efficient management of large-scale photovoltaic projects, addressing the main technical, economic, financial, regulatory, and environmental challenges faced by the solar industry. The work includes a review of the theoretical foundations of photovoltaic energy, its evolution and applications, as well as a benchmarking analysis of international methodologies. The proposed methodology integrates strategic planning tools, innovative financing models, cost optimization practices, and sustainability criteria, aiming to maximize the viability, efficiency, and profitability of solar projects. The results show that applying this methodology reduces risks, improves grid integration, and supports a sustainable energy transition.

Keywords: photovoltaic energy, project management, large scale, sustainability, cost optimization.

Tabla de Contenido

Resumen	2
Abstract.....	3
Lista de Tablas	6
Lista de Figuras.....	6
Introducción.....	7
Planteamiento del problema.....	8
Objetivos.....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	9
Identificación de desafíos y problemáticas en proyectos fotovoltaicos de gran escala	10
Ubicación y Zonas de Implementación	10
Problemas de Oferta y Demanda	12
Competencia y Saturación del Mercado.....	15
Desafíos financieros y de inversión	18
Costos y viabilidad económica	20
Aspectos Técnicos y su Impacto Económico.....	23
Benchmarking de metodologías en proyectos fotovoltaicos exitosos	26
Control y optimización de costos.....	26
Tabla 1 <i>Principales Estrategias Utilizadas en Proyectos de Referencia</i>	27

Estructuración financiera y sostenibilidad	30
Prácticas sostenibles y su impacto	32
Metodologías técnicas y su influencia	36
Estrategias para la optimización de la planificación, ejecución y seguimiento de proyectos fotovoltaicos.....	39
Planificación estratégica	39
Gestión financiera y económica	42
Ejecución técnica eficiente	44
Gestión de costos operativos	47
Sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo.....	50
Conclusiones	53
Recomendaciones	55
Referencias.....	57

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Principales Estrategias Utilizadas en Proyectos de Referencia</i>	27
--	----

Lista de Figuras

Figura 1	12
Figura 2	14
Figura 3	16
Figura 4	18
Figura 5	21

Introducción

La energía fotovoltaica se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras para la generación de electricidad limpia y sostenible a nivel global. Su capacidad para transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica ha permitido su aplicación tanto en zonas urbanas como rurales, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones contaminantes y al acceso universal a la energía.

En el contexto de la transición energética y los compromisos internacionales de descarbonización, los proyectos fotovoltaicos de gran escala representan una solución estratégica para diversificar la matriz energética, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y promover el desarrollo económico y social en diferentes regiones. Sin embargo, la ejecución de estos proyectos enfrenta retos complejos relacionados con la selección de ubicaciones óptimas, integración a la red, financiamiento, gestión de riesgos, cumplimiento regulatorio y sostenibilidad ambiental.

Este trabajo de grado tiene como objetivo principal proponer una metodología integral que permita mejorar la eficiencia y efectividad en la gestión de proyectos solares de gran escala. Para ello, se realiza un análisis de los fundamentos técnicos de la energía fotovoltaica, se identifican los principales desafíos y se revisan las mejores prácticas internacionales en planificación, ejecución y operación de estos proyectos. Finalmente, se presentan recomendaciones orientadas a maximizar el impacto positivo de la energía solar en la transición energética y el desarrollo sostenible.

Planteamiento del problema

El problema central que se aborda en esta monografía es la gestión eficiente de proyectos fotovoltaicos de gran escala. A medida que el mundo se aleja de los combustibles fósiles y se dirige hacia las energías renovables, la energía solar se ha convertido en una opción cada vez más popular. Sin embargo, la implementación de estos proyectos presenta una serie de desafíos únicos. (TIC, s.f.) Uno de los primeros desafíos es la naturaleza intermitente de la energía solar significa que la producción de energía está sujeta a variaciones diurnas y estacionales, así como a las condiciones climáticas. Esto plantea problemas para la planificación de la capacidad y la gestión de la red. En segundo lugar, la magnitud de estos proyectos requiere una inversión inicial significativa y pueden tener largos períodos de amortización. Esto puede hacer que estos proyectos sean financieramente riesgosos, especialmente en mercados donde el precio de la electricidad es bajo o inestable. Un tercer desafío es que para su gestión requiere una amplia gama de habilidades y conocimientos técnicos. Esto incluye la comprensión de la tecnología fotovoltaica, la gestión de la construcción, la operación y el mantenimiento de las instalaciones, y la navegación por el marco regulatorio y de permisos. Por último, la implementación puede tener impactos sociales y ambientales significativos, que deben ser gestionados de manera efectiva. Esto puede incluir la gestión de las relaciones con las comunidades locales, la mitigación de los impactos en la fauna y la flora, y la gestión de los residuos al final de la vida útil del proyecto. La gestión de proyectos fotovoltaicos de gran escala es un problema complejo y multifacético que requiere una cuidadosa planificación y gestión. Esta monografía busca proporcionar una visión detallada de este problema y ofrecer soluciones prácticas y efectivas.

Objetivos

Objetivo general

Identificar una metodología integral que permita mejorar la eficiencia y efectividad en la ejecución de proyectos fotovoltaicos de gran escala, enfocándose en la identificación y optimización de procesos clave, la mitigación de riesgos y la implementación de prácticas sostenibles. Esto se logrará a través de un análisis exhaustivo de los desafíos en sus distintos procesos, así como de la evaluación de su ciclo de vida. La metodología propuesta buscará facilitar la implementación exitosa de estos proyectos, promoviendo un modelo energético más sostenible y renovable.

Objetivos específicos

Investigar y documentar los principales desafíos y riesgos asociados con la gestión de proyectos fotovoltaicos de gran escala, centrándose en los aspectos contables, económicos, financieros, administrativos y técnicos de las áreas de ingeniería civil, ingeniería de mecánica estructural e ingeniería eléctrica.

Analizar las metodologías de gestión de proyectos predictivos y ciclos de vida con enfoque en cascada; aplicables específicamente a proyectos fotovoltaicos de gran escala, identificando las variables asociadas al producto, al proyecto y la organización. Con el fin de contribuir la mejora de eficiencia y efectividad en la ejecución de estos proyectos.

Proponer estrategias y recomendaciones específicas para abordar los desafíos identificados y optimizar la planificación, ejecución y seguimiento de proyectos fotovoltaicos de gran escala, con el objetivo de maximizar su viabilidad económica, técnica y ambiental.

Identificación de desafíos y problemáticas en proyectos fotovoltaicos de gran escala

Los proyectos fotovoltaicos de gran escala enfrentan diversos desafíos que pueden influir significativamente en su viabilidad y éxito. Estos desafíos abarcan desde la identificación de ubicaciones óptimas para la implementación de las plantas, hasta la superación de barreras relacionadas con la oferta y demanda energética en diferentes regiones. Asimismo, se presentan dificultades asociadas a la obtención de financiamiento adecuado, el análisis de costos y viabilidad económica, y la integración de tecnologías avanzadas que optimicen el desempeño técnico y financiero de los proyectos. A continuación, se detallan los principales retos que deben abordarse para garantizar el desarrollo eficiente y sostenible de este tipo de iniciativas.

Ubicación y Zonas de Implementación

La selección adecuada del sitio para la instalación de proyectos fotovoltaicos es crucial. Factores como la radiación solar, topografía del terreno, cercanías a la red eléctrica, entre otros. Además, es esencial considerar aspectos ambientales y sociales para minimizar impactos negativos y facilitar la aceptación por parte de las comunidades locales. Estos factores influyen directamente en la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad de los proyectos.

Lograr la eficiencia de un proyecto fotovoltaico depende en gran medida de la cantidad de **radiación** solar disponible en la ubicación seleccionada. Regiones con alta irradiación solar garantizan una mayor generación de energía. Sin embargo, es esencial evaluar las **condiciones climáticas** locales, ya que factores como la acumulación de nieve pueden afectar el rendimiento de los paneles solares. Por ejemplo, en zonas con inviernos largos y nevados, la instalación vertical de paneles ha demostrado ser más eficiente debido al efecto albedo, donde la luz solar reflejada por la nieve incrementa la energía captada. (huffpost, s.f.)

Otro de los factores primordiales para tener en cuenta en los estudios y diseños técnicos es la **topografía** del terreno, la cual influye en la instalación y eficiencia de los paneles solares. Terrenos planos facilitan la construcción de las estructuras de soporte y optimizan la orientación de los paneles. Además, es recomendable utilizar áreas previamente adecuadas o contaminadas, como antiguos sitios industriales, para minimizar impactos ambientales y aprovechar terrenos que de otro modo permanecerían inutilizados. (EPA)

También es muy importante considerar la **cercanía a infraestructuras eléctricas existentes**, como líneas de transmisión y subestaciones, es crucial para reducir costos asociados a la conexión y distribución de la energía generada. Ubicaciones alejadas pueden incrementar significativamente los gastos en infraestructura y mantenimiento.

Es fundamental evaluar y mitigar posibles **impactos ambientales y sociales**. La presencia de fauna y flora sensibles, así como la proximidad a comunidades locales, deben ser consideradas para evitar conflictos y promover la aceptación del proyecto. La realización de estudios de impacto ambiental detallados y la participación de las comunidades en el proceso de planificación son prácticas recomendadas. (MITECO, 2022)

La accesibilidad del sitio afecta directamente los costos y tiempos de construcción. Ubicaciones con buenas vías de acceso facilitan el transporte de materiales y equipos, reduciendo complicaciones **logísticas y gastos adicionales**.

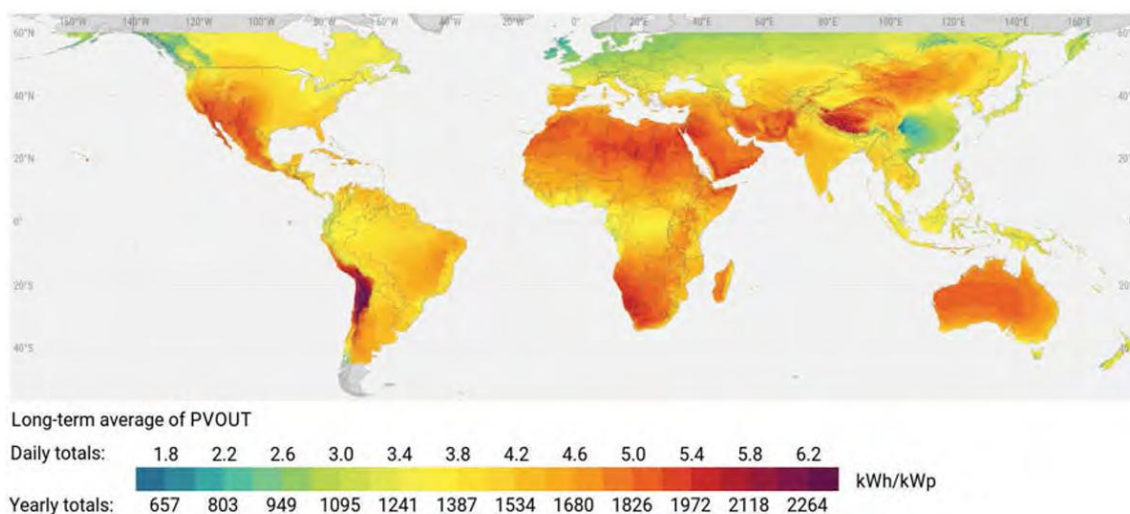
El Banco Mundial realizó un estudio en junio de 2020 llamado Global Photovoltaic Power Potential by Country, el cual proporciona una visión integral y estandarizada del recurso solar y las oportunidades para desarrollar plantas de energía fotovoltaica a gran escala, analizadas desde el nivel regional y nacional. Este informe se basa en datos consistentes, de alta

precisión y confiabilidad, además de emplear una metodología reproducible que garantiza la comparabilidad de los resultados. (World Bank Group, 2020)

La siguiente grafica representa el potencial práctico de energía solar fotovoltaica, mostrando el promedio a largo plazo de la irradiancia solar diaria y anual en diversas regiones del mundo.

Figura 1

Promedio de potencial práctico de energía solar FV diarios/anuales.



Nota. Este grafico corresponde al promedio de energía solar en el mundo. Tomado de Banco Mundial, 2022, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*.

Problemas de Oferta y Demanda

La intermitencia inherente a la generación solar plantea desafíos para equilibrar la oferta y la demanda de energía. La generación de energía solar depende de las condiciones climáticas y la disponibilidad de luz solar, que no siempre coincide con la demanda. Por tanto, la capacidad

de almacenar la energía generada durante períodos de baja radiación solar es esencial para garantizar un suministro constante y confiable. (Next, 2024)

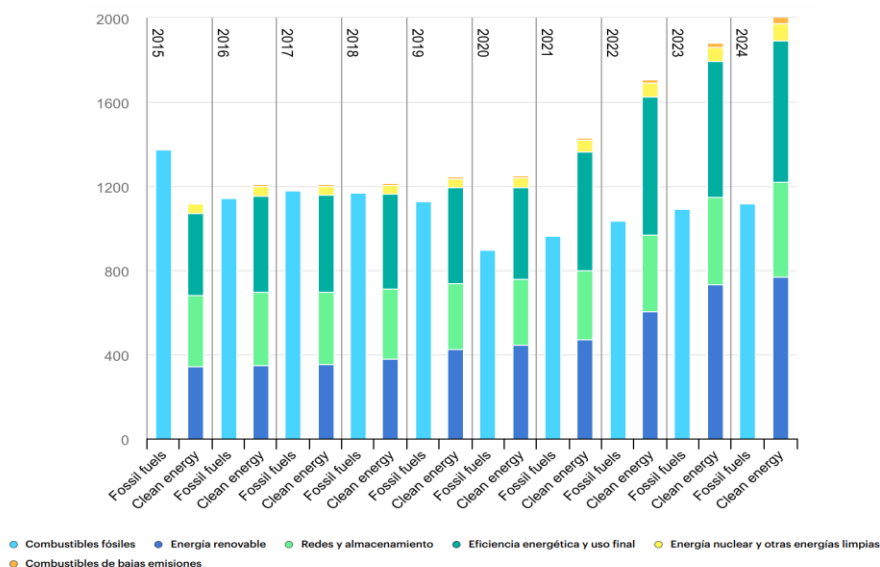
La generación de energía solar depende de factores climáticos como la irradiación y la nubosidad, lo que la hace intermitente. Esto es conocido como **variabilidad de la producción solar**, lo que puede generar desequilibrios en la oferta de energía, afectando la estabilidad del sistema eléctrico, a lo cual se requiere soluciones como el almacenamiento de energía o la combinación con otras fuentes de generación. (Timmons, Harris, & Roach)

Las zonas con mayor potencial fotovoltaico no siempre coinciden con las áreas de mayor consumo energético. Este desajuste requiere inversiones significativas en infraestructura de transmisión para trasladar la energía desde los centros de producción hasta los puntos de demanda, aumentando los costos y generando posibles pérdidas en el transporte de electricidad. Dichas variables deben ser consideradas en una misma ecuación con el fin de determinar el nivel de **desajuste geográfico** en función de la **generación y consumo** en demanda. (Cadena SER, 2024)

La energía solar compite con otras fuentes energéticas, incluidas las fósiles y las hidroeléctricas. Las fluctuaciones en los precios de la energía y las políticas de subsidios pueden afectar la competitividad de la energía solar, impactando las decisiones de inversión y la expansión de nuevos proyectos. Esta **competencia en el mercado** energético no solo se refleja en los tipos de fuentes de generación, sino también en entre las diferentes empresas que buscan posicionamiento. (Tibo Energy, 2024)

Figura 2

Inversión mundial en energía limpia y combustibles fósiles, 2015-2024.



Nota. Este gráfico corresponde a la inversión en miles de millones de dólares para fuentes de energía limpia y fósil en el mundo. Tomado de la Agencia Internacional de Energía (IEA), 2024.

El **marco regulatorio** y las **condiciones del mercado** eléctrico pueden representar obstáculos significativos para la integración de proyectos fotovoltaicos a gran escala. Estas barreras se manifiestan en diversas áreas, desde la capacidad de inyección de energía hasta la estructura de los mercados eléctricos y los esquemas tarifarios. Las redes eléctricas tienen una capacidad limitada para absorber energía intermitente, lo que obliga a imponer restricciones técnicas y regulatorias sobre la inyección de energía renovable. En muchos países, los desarrolladores de proyectos fotovoltaicos deben enfrentarse a largos procesos de evaluación para obtener permisos de conexión, además de pagar tarifas por el acceso a la infraestructura de transmisión. Esto puede retrasar la implementación de proyectos y aumentar los costos operativos. (IEA, International Energy Agency, 2024)

El desarrollo de estos proyectos también debe pasar por **procesos administrativos complejos** y múltiples **aprobaciones regulatorias**, que incluyen estudios de impacto ambiental, licencias de construcción y permisos de operación. Dichos procesos requieren una serie de trámites que pueden tener largos periodos de revisión. En algunos mercados, estos procesos pueden tomar varios años, generando incertidumbre para los inversionistas y reduciendo la velocidad de despliegue de nuevas instalaciones. (CERRE, 2024), (Yepes, 2020)

Los mercados eléctricos están diseñados para favorecer fuentes de generación tradicionales, como la térmica e hidroeléctrica, que ofrecen estabilidad en la producción. La energía fotovoltaica, al ser intermitente, enfrenta dificultades para competir en mercados mayoristas que privilegian contratos de energía firme. Además, algunos países aún subsidian los combustibles fósiles, afectando la **competitividad de la energía solar**. (IEA, Integración de energía solar y eólica, 2024)

Los esquemas de **remuneración** de energía solar pueden verse afectados por regulaciones que limitan los precios de compra o imponen **tarifas** adicionales a los productores. En algunos países, las tarifas de respaldo o cargos por capacidad penalizan a las energías renovables, reduciendo su atractivo financiero. (XM, 2024)

Competencia y Saturación del Mercado

El **incremento de la competencia** en el mercado solar fotovoltaico se estima que alcance los 6,09 mil gigavatios en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 22,90% durante este período. Este crecimiento será impulsado por políticas gubernamentales favorables y la creciente adopción de sistemas solares fotovoltaicos, junto con la disminución de los precios de los paneles solares y los costos de instalación. No obstante, el avance de otras tecnologías

renovables, como la energía eólica y la bioenergía, podría obstaculizar este crecimiento. A pesar de ello, los esfuerzos de varios gobiernos en regiones emergentes, como África y el sudeste asiático, para proporcionar acceso total a la electricidad en áreas remotas, junto con aplicaciones fuera de la red y avances tecnológicos en módulos solares fotovoltaicos, crearán amplias oportunidades en el futuro cercano. (Intelligence, 2024)

Figura 3

Tendencias del mercado solar fotovoltaico, 2023-2028.



Nota. La figura muestra la tendencia de la tasa de crecimiento del mercado solar fotovoltaico por regiones. Tomado de Mordo Intelligence, 2024.

El aumento en la adopción de energía solar ha llevado a una mayor competencia en el mercado. Empresas como Longi, uno de los mayores fabricantes de paneles solares en China, han experimentado pérdidas significativas debido a la creciente competencia y otros factores del mercado. En 2024, Longi anunció pérdidas netas de hasta 1.167 millones de euros, en contraste con los beneficios de 10.800 millones de yuanes en 2023. La empresa atribuye esta evolución a la creciente competencia en el sector, pérdidas extraordinarias relacionadas con un productor de

materiales de silicio y errores en la gestión corporativa durante el tercer trimestre de 2024. (Pais, 2025)

En ciertas regiones, la **rápida aprobación de proyectos** fotovoltaicos ha llevado a una **saturación del mercado**. Por ejemplo, en algunos países se han aprobado aproximadamente 25 gigavatios (GW) en declaraciones de impacto ambiental, lo que ha generado una sobreoferta de proyectos en desarrollo. Esta saturación puede resultar en retrasos en la ejecución de proyectos y en una competencia más intensa por recursos limitados, como terrenos adecuados y conexiones a la red eléctrica. (Energética, 2024)

Existe un término económico llamado **canibalización en el mercado eléctrico**, este se refiere a la disminución de los precios de la electricidad durante períodos de alta producción de energía renovable, como en días soleados o ventosos. Aunque esto beneficia a los consumidores, puede afectar la rentabilidad de los proyectos fotovoltaicos, ya que los ingresos disminuyen en momentos de alta generación. Este fenómeno puede desincentivar nuevas inversiones en energía solar y ralentizar la expansión de estas tecnologías. Lo que representa impactos en la reducción de la rentabilidad, incertidumbre en los mercados energéticos y desafíos para la transición de otras tecnologías energéticas. (Víctor Baeschlin, s.f.)

La **generación distribuida (GD)**, es la autogeneración basada en energías renovables no convencionales, está ganando terreno en muchos mercados. Aunque la GD ofrece ventajas como la reducción de pérdidas en la transmisión y una mayor resiliencia energética, también representa una competencia para los proyectos fotovoltaicos de gran escala. La proliferación de sistemas de GD puede reducir la demanda de energía de plantas solares a gran escala, afectando su rentabilidad y viabilidad a largo plazo. (INVESTIGACIÓN, 2021)

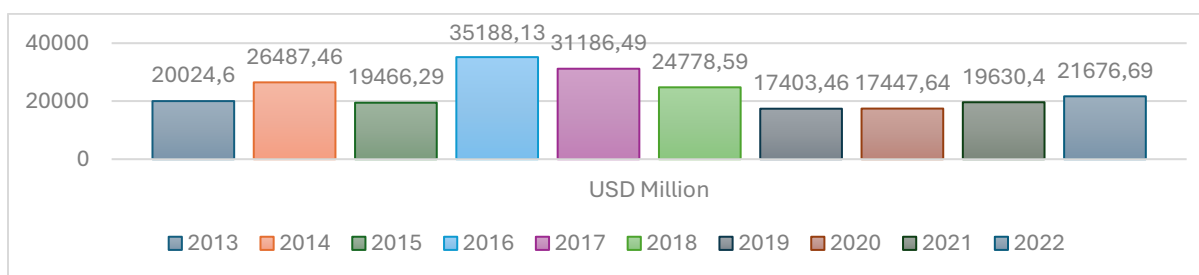
Desafíos financieros y de inversión

El financiamiento y la inversión representan factores críticos que determinan la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. La rentabilidad de estos proyectos depende en gran medida de su estructura de costos, las fuentes de financiamiento disponibles, las condiciones del mercado y las políticas gubernamentales. A continuación, se detallan los principales desafíos en este ámbito.

Los proyectos requieren de un **alto costo de inversión inicial** para la adquisición de módulos solares, inversores, sistemas de montaje, infraestructura de transmisión y almacenamiento, así como para la obtención de permisos y estudios técnicos. Según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), el costo promedio de instalación de parques solares en 2023 varió entre 800 y 1.200 dólares por kW instalado. Aunque estos costos han disminuido con el tiempo, siguen siendo un obstáculo para muchos inversionistas, especialmente en mercados emergentes con menor acceso a financiamiento. (IRENA, 2024)

Figura 4

Flujos de Financiación Pública en Energías Renovables 2013-2022



Nota. Esta grafica corresponde al flujo de financiación pública en miles de millones de dólares para fuentes de energía renovable. Tomado de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), 2024.

Los mecanismos de **financiamiento** varían según la región y el tipo de inversores involucrados. En mercados desarrollados, los proyectos pueden obtener financiamiento a través

de bancos comerciales, organismos multilaterales, bonos verdes y fondos de inversión en infraestructura. Sin embargo, en países en desarrollo, el acceso al crédito suele ser más restringido y las **tasas de interés** más elevadas, lo que encarece el costo total del proyecto. Además, el nivel de riesgo país y la estabilidad macroeconómica influyen directamente en la disponibilidad de capital y en las condiciones de financiamiento. En América Latina, por ejemplo, los proyectos pueden enfrentar tasas de interés de hasta 10-12% anual, mientras que en Europa o EE. UU. pueden acceder a financiamiento con tasas inferiores al 5%. (LP, s.f.)

Los desarrolladores de proyectos fotovoltaicos deben estructurar **modelos de financiación** sostenibles, considerando aspectos como el *financiamiento basado en deuda*, el cual es utilizado en grandes proyectos, donde el reembolso se garantiza con los ingresos generados por la venta de electricidad. También existe el *financiamiento mediante capital propio*, este requiere atraer inversionistas interesados a largo plazo, como fondos de infraestructura o compañías de energía. Por otro lado, se pueden financiar proyectos por medio de *Power Purchase Agreements*, son contratos a largo plazo con empresas o gobiernos que garantizan ingresos estables y facilitan la obtención de financiamiento. Según un informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables, el 81% de las nuevas instalaciones renovables en 2023 fueron más económicas que las alternativas basadas en combustibles fósiles, lo que ofrece argumentos sólidos para la inversión en energías renovables. (IRENA, International Renewable Energy Agency, 2024)

En mercados con alta **volatilidad cambiaria**, los proyectos fotovoltaicos pueden ver afectados sus costos de financiamiento y sus ingresos. La depreciación de la moneda local frente al dólar o euro puede encarecer la compra de equipos importados y aumentar el costo del servicio de la deuda. Por otro lado, los **incentivos gubernamentales** como subsidios, tarifas feed-in (FiT)

y beneficios fiscales pueden hacer más atractivos los proyectos. Sin embargo, la eliminación repentina de estos incentivos, como ha sucedido en algunos países, puede afectar la rentabilidad esperada. (PV Magazine, 2018)

Otro gran desafío antes de invertir en un proyecto fotovoltaico es la **evaluación de riesgos** que se debe desarrollar. Iniciando con factores técnicos que van desde la capacidad de generación esperada, variabilidad climática, posibilidades de integración con sistemas de almacenamiento y redes inteligentes, costos de mantenimiento y operación a largo plazo. además, se deben contemplar los factores de riesgo que pueden generarse por las políticas de compra de energía y estabilidad del mercado eléctrico. Estos riesgos afectan directamente los procesos EPC (Engineering, Procurement and Construction) y AOM (Administración Operación y Mantenimiento), en consecuencia, influyen mucho en la **rentabilidad**. Según estudios, un parque fotovoltaico eficiente puede alcanzar una tasa interna de retorno (TIR) significativa, dependiendo de las condiciones del financiamiento y la regulación. (The Eco Experts, 2023)

Costos y viabilidad económica

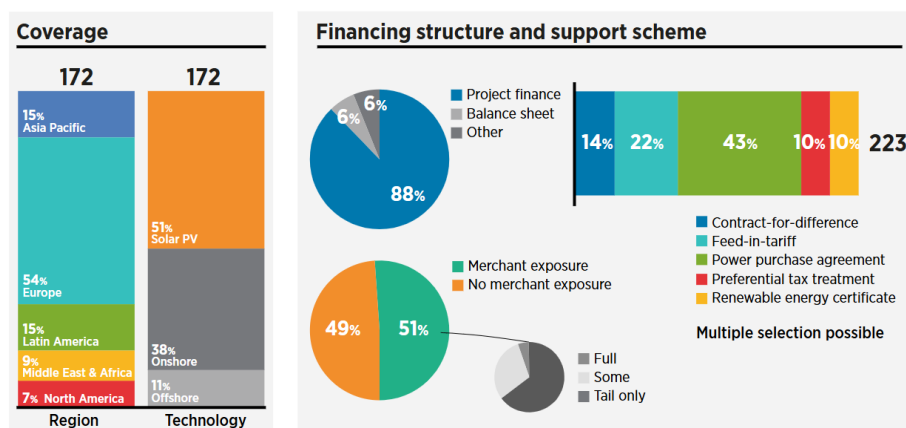
La viabilidad económica depende del análisis detallado de los costos involucrados y su proyección financiera a lo largo del tiempo. Si bien los costos de generación de energía solar han disminuido significativamente en la última década, todavía existen desafíos relacionados con la inversión inicial, los costos operativos, la gestión del financiamiento y la integración a la red. Este apartado analiza los principales factores que afectan la estructura de costos y la rentabilidad.

IRENA (International Renewable Energy Agencia) desarrollo un informe para determinar el costo de financiamiento para energías renovables, recopilando y procesando información muy importante de diversas regiones y tecnologías, proporcionando una visión integral de los factores

que influyen en el costo del capital en este sector energético. La siguiente grafica detalla los principales hallazgos.

Figura 5

Factores que influyen el costo de financiamiento para energías renovables.



Nota. Esta grafica corresponde a la cobertura de información y factores contextuales que influyen sobre el costo de capital en fuentes de energía renovable. Tomado de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), 2023.

El **costo de capital** (CAPEX) representa la inversión inicial necesaria para la construcción y puesta en marcha de una planta fotovoltaica. Este costo se desglosa en los siguientes elementos principales: *Módulos fotovoltaicos*, constituyen entre el 30% y 50% del CAPEX total; su precio varía según la tecnología utilizada (silicio monocristalino, policristalino, heterounión, perovskitas, entre otros) y las condiciones del mercado. *Inversores y sistemas de conversión*, son los componentes responsables de transformar la corriente continua en corriente alterna para su integración en la red; y representan aproximadamente el 10% del CAPEX. *Estructuras de montaje y sistemas de seguimiento solar*, los sistemas de seguimiento aumentan la eficiencia en la captación de radiación solar, pero incrementan el costo inicial del proyecto. *Obras civiles y montaje*, dicho componente incluye preparación del terreno, cimentación,

instalación de equipos y costos de mano de obra. *Costos de conexión a la red*, los costos de conexión dependen de la proximidad a las líneas de transmisión y los requerimientos de interconexión del sistema eléctrico. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), el costo promedio de instalación de un parque solar de gran escala ha disminuido un 82% desde 2010, situándose en \$0.044/kWh en 2023. (IRENA, EnerNews, 2023)

Los **costos operativos y de mantenimiento (OPEX)** son determinantes para la sostenibilidad financiera del proyecto. Generalmente la vida útil de una planta solar está entre 25 y 30 años, durante este tiempo se deben tener en cuenta los siguientes costos: *Mantenimiento preventivo y correctivo*, donde se llevan a cabo inspecciones, limpieza de paneles, revisión de inversores, mantenimiento de estructuras y reemplazo de componentes defectuosos. También deben contemplarse costos para la *gestión de infraestructura eléctrica*, donde se realizan supervisiones a subestaciones, sistemas de protección y transmisión de energía. Para tener operando estos sistemas energéticos se debe contar con *seguros y garantías*, estos costos son necesarios para tener cobertura ante desastres naturales, vandalismo o fallos en la producción. Por último, existen los costos administrativos y de gestión contractual, son obligaciones ya que incluyen la gestión administrativa de acuerdos de compra de energía y el cumplimiento de normativas locales. El OPEX en un parque solar de gran escala oscila entre \$10 y \$20 por kW/año, dependiendo de la tecnología utilizada y las condiciones ambientales. (Ministerio de Energías, 2018)

El **Costo Nivelado de la Energía (LCOE)**, por sus siglas en inglés) es un indicador clave que mide el costo promedio de producción de electricidad durante la vida útil del proyecto. Se calcula considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como el factor de capacidad de la planta. Según Bloomberg New Energy Finance (BNEF), el LCOE de la energía

solar ha disminuido un 89% desde 2009, situándose como una de las fuentes más competitivas del mercado. (IRENA, International Renewable Energy Agency, 2023)

El análisis de costos y viabilidad económica son factores que, a pesar de la continua reducción en costos tecnológicos y mejoras en eficiencia, los proyectos deben enfrentarse a desafíos operativos, regulatorios y financieros que pueden afectar su sostenibilidad. Para maximizar la rentabilidad, es esencial una planificación estratégica que optimice los costos de inversión, reduzca los costos operativos y garantice acceso a financiamiento competitivo.

Aspectos Técnicos y su Impacto Económico

El rendimiento y la rentabilidad dependen en gran medida de factores técnicos que influyen directamente en la eficiencia de generación, la vida útil de los equipos y los costos operativos. Desde la selección de la tecnología de módulos hasta la configuración del sistema eléctrico, cada decisión técnica tiene un impacto económico. En este ítem, se analizarán los principales aspectos técnicos que afectan la viabilidad económica de una planta de energía solar.

Existen diversas **tecnologías para la fabricación de módulos fotovoltaicos**, siendo el componente central de un parque fotovoltaico su tecnología determina la **eficiencia** de la cantidad de energía que puede ser generada por una unidad de superficie. Existen diversas tecnologías, cada una con costos y rendimientos distintos. Entre las principales para desarrollos comerciales están, el *silicio monocristalino* (Mono-Si) generando una alta eficiencia (>22%), con un mayor costo inicial, pero mejor rendimiento en espacios reducidos. También existe el *silicio policristalino* (Poly-Si): con una eficiencia media (17%-20%), siendo de menor costo, pero menor rendimiento en condiciones de baja irradiación. Las tecnologías de *heterounión* (HJT) y TOPCon son emergentes con mayor eficiencia (>24%) pero costos más elevados. Por último,

tenemos las tecnologías *Perovskitas* y *Células Tandem*, las cuales se encuentran en desarrollo, con gran potencial para superar el 30% de eficiencia. La elección de una tecnología más eficiente puede reducir el área requerida y mejorar el rendimiento a largo plazo, impactando positivamente el Costo Nivelado de la Energía. (IRENA, International Renewable Energy Agency, 2019)

Los **sistemas de seguimiento** permiten que los paneles se orienten en función de la posición del sol, aumentando la captación de radiación. Existen dos tipos principales, seguimiento de un eje (horizontal o vertical), con el cual se aumenta la producción de energía entre un 15% y 25%, con un sobrecosto del 10% -15% sobre el CAPEX. Y el seguimiento de doble eje: Incrementa la generación hasta un 35%, pero con un mayor costo de inversión y mantenimiento. Si bien los sistemas de seguimiento aumentan la eficiencia, su implementación debe ser en función del retorno de inversión (ROI) y la capacidad de mantenimiento de los equipos. (MINT, 2018)

El **diseño** óptimo de una planta fotovoltaica tiene un impacto directo en los costos de instalación, operación y rendimiento. Algunos factores clave incluyen la densidad de instalación, esto corresponde al espaciado adecuado entre filas para minimizar el sombreado y maximizar la captación solar. También se debe considerar la inclinación y orientación de los paneles con el fin de tener un ajuste óptimo según la latitud del sitio para maximizar la generación anual. Además, se debe diseñar una configuración de strings y conexiones con el balance adecuado entre eficiencia de conversión y reducción de pérdidas. Un diseño eficiente puede reducir las pérdidas energéticas entre el 5% al 10%, mejorando la rentabilidad del proyecto. (Guevara)

Los **inversores** convierten la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna para su integración a la red eléctrica. Su **eficiencia y confiabilidad** impactan la estabilidad y el rendimiento del sistema. Existen varios tipos de equipos como, los inversores

centralizados que tienen un menor costo por kW y eficiencia, pero mayor riesgo de falla centralizada. También están los inversores en cadena, los cuales son de mayor flexibilidad y redundancia, aunque con mayor costo por unidad de potencia. Y tenemos los microinversores, que son óptimos para mitigación de sombras y generación distribuida, pero poco comunes en gran escala debido a su alto costo. Los inversores tienen una eficiencia promedio del 97% al 99%, y su selección adecuada puede reducir pérdidas de conversión y costos operativos. (Cruz Carrascal & de la Fuente Casal)

El almacenamiento con baterías puede mejorar la estabilidad y rentabilidad de una planta fotovoltaica al permitir la entrega de energía en momentos de alta demanda. Sin embargo, los costos de baterías siguen siendo elevados. Las BESS (Battery Energy Storage System) de ion-litio tienen mayor eficiencia (>90%) y una vida útil aproximada de 15 años, pero alto costo de inversión. Las baterías de flujo tienen una menor densidad energética, pero mayor durabilidad y estabilidad. El costo del almacenamiento se ha reducido en un 85% desde 2010, pero sigue siendo un limitante. Su implementación depende de la regulación del mercado y los incentivos disponibles. (IRENA, 2021)

Las **pérdidas** en un sistema fotovoltaico pueden reducir significativamente su **rentabilidad**. Algunas de las principales pérdidas incluyen pérdidas por temperatura, donde los módulos pierden eficiencia ($\sim 0.4\% - 0.5\% / ^\circ\text{C}$) cuando operan por encima de la temperatura nominal. También existen las pérdidas por descubrimiento, estas corresponden a la acumulación de polvo y suciedad que puede reducir la generación en un 5%-10% si no se realiza una limpieza periódica. Podemos encontrar pérdidas por conversión e interconexión, estas se dan en los transformadores, cables y equipos eléctricos que pueden generar pérdidas de hasta el 5% del total generado.

Benchmarking de metodologías en proyectos fotovoltaicos exitosos

La integración de metodologías predictivas y modelos de ciclo de vida estructurados se ha convertido en un pilar fundamental para la gestión eficiente de estos proyectos.

Profundizaremos en enfoques técnicos y operativos validados, centrándose en la optimización de costos mediante la sostenibilidad financiera basada en modelos dinámicos, y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para predecir variables críticas. A continuación, se desglosan los componentes esenciales de estas metodologías, respaldados por estudios de caso y análisis comparativos.

Control y optimización de costos

Las empresas del mercado energético deben tener el control y una optimización en los costos de sus proyectos, dado a que estos factores determinan y garantizan la viabilidad económica y la rentabilidad a largo plazo. Diversas metodologías y estrategias han sido implementadas en proyectos exitosos alrededor del mundo, destacando la planificación, gestión eficiente de la construcción, reducción de costos operativos y uso de tecnología avanzada.

La optimización de costos en proyectos fotovoltaicos depende de la capacidad para anticipar fluctuaciones en insumos críticos, como módulos solares, inversores y costos laborales. Según datos de IRENA, el costo nivelado de energía (LCOE) para proyectos solares a escala comercial disminuyó un 82% entre 2010 y 2023, alcanzando \$0.044/kWh, gracias a mejoras en eficiencia y economías de escala. (IRENA, s.f.) Implementar algoritmos de regresión lineal múltiple para ajustar presupuestos en tiempo real, considerando variables como la volatilidad cambiaria y los plazos de entrega de equipos, este enfoque puede reducir los sobrecostos no

planificados en un 18%, demostrando la utilidad de modelos predictivos en la gestión financiera. (Universidad EAFIT, 2024)

Además, estudios de la GIZ revelan que las compras agregadas de paneles y sistemas de seguimiento solar pueden reducir el CAPEX entre 12% y 15%. Estas estrategias se complementan con contratos EPC basados en métricas de rendimiento, donde los contratistas asumen riesgos técnicos y operativos, garantizando cumplimiento en plazos y especificaciones. Por ejemplo, en el parque solar Andasol (España), la incorporación de cláusulas de penalización por incumplimiento de eficiencia energética aseguró un performance ratio (PR) ≥ 0.85 durante la fase operativa. (RCCI, s.f.)

A continuación, se presentan las principales estrategias utilizadas en proyectos de referencia, comparando metodologías y casos de éxito utilizando un **benchmarking sobre los factores de control y optimización de costos**. Esto nos permite identificar las mejores prácticas y tendencias clave en la industria.

Tabla 1

Principales Estrategias Utilizadas en Proyectos de Referencia

Método / Estrategia	Descripción	Ejemplo de Proyecto
Selección estratégica del sitio	Elegir ubicaciones con alta irradiación y cercanía a infraestructura eléctrica para minimizar costos de interconexión.	Noor Abu Dhabi (EAU) - 1.2 GW
Estandarización de componentes	Uso de módulos, inversores y estructuras uniformes para reducir costos de producción y logística.	Kamuthi Solar Power (India) - 648 MW

Contratos EPC eficientes	Contratación de empresas con experiencia y acuerdos de desempeño para reducir sobrecostos.	Huanghe Hydropower Golmud (China) - 2.2 GW
Automatización de construcción	Uso de robots para la instalación de paneles y reducción de costos laborales.	Bhadla Solar Park (India) - 2.2 GW
Mantenimiento predictivo con IA	Análisis de datos para anticipar fallas y reducir costos de reparación.	Villanueva Solar Park (México) - 828 MW

Nota: Esta tabla identifica las principales estrategias utilizadas en proyectos fotovoltaicos y respectivos casos de éxito.

Con el fin abarcar un panorama más amplio en el control y la optimización de costos continuaremos con las principales perspectivas de benchmarking identificando estrategias, métodos, metodologías y tecnologías que han implementado en casos de éxito.

Existen **estrategias para la reducción de costos** en la fase inicial, donde se ha comprobado que una **planificación efectiva** reduce significativamente los costos en la construcción y operación de un parque solar. Las mejores prácticas que se han implementado van desde:

- **Selección de ubicaciones óptimas:** Proyectos como Noor Abu Dhabi (Emiratos Árabes Unidos) han logrado costos de generación competitivos (\$0.024/kWh) al seleccionar zonas con irradiación superior a 2,100 kWh/m², según datos del Global Solar Atlas del Banco Mundial. (Banco Mundial, s.f.)

- **Optimización del diseño del sistema:** En la India la planta solar Kamuthi implementó una distribución modular de paneles, optimizando la eficiencia y reduciendo costos de instalación en un 15%. (Fraunhofer ISE, s.f.)

- **Estandarización y economía de escala:** En proyectos como Huanghe Hydropower Golmud en China, el uso de módulos homogéneos que permitió una reducción del 20% en costos de adquisición y logística. (IRENA, s.f.)

Luego de la planificación también se deben implementar **métodos de control de costos durante la ejecución**, esto es clave para evitar sobrecostos y retrasos en la construcción. Existen estrategias muy efectivas comprobadas e implementadas, estas incluyen:

- **Gestión Lean Construction:** Aplicada en Bhadla Solar Park (India), la cual permitió reducir un 18% desperdicios de materiales y optimizar la eficiencia en la instalación. (LP, s.f.)
- **Uso de drones para supervisión:** En Villanueva Solar Park (México), la implementación de drones redujo los costos de inspección en un 30% y aceleró la detección de anomalías. (IRENA, s.f.)
- **Automatización en la instalación:** En muchos proyectos EPC la contratación de personal certificado es baja en ciertas zonas apartadas, es por ello que, en proyectos como Dubai Solar Park utilizan robots para la colocación de paneles, reduciendo los tiempos de instalación y los costos laborales en un 25%. (Fraunhofer ISE, s.f.)

Optimizar costos operativos y de mantenimiento con tecnología es fundamental para garantizar la rentabilidad a largo plazo. Es por ello que las empresas continuamente implementan tecnologías clave que incluyen:

- **Sistemas de monitoreo en tiempo real:** Implementado en Noor Abu Dhabi, permite detectar fallos en inversores y paneles, optimizando la producción energética.

- Drones con termografía infrarroja: En la granja solar Topaz (USA), implementaron drones con detección automática, esta tecnología redujo los tiempos de inspección en un 40% y los costos de mantenimiento en un 15%.
- Limpieza automatizada de paneles: La automatización del parque solar Bhadla con robots sin agua para limpiar paneles, redujo las pérdidas de generación por suciedad y optimizó la eficiencia del sistema.

Esta comparativa demuestra que la combinación de una planificación estratégica, tecnologías avanzadas y modelos eficientes de operación puede generar ahorros significativos; permitiendo que proyectos exitosos hayan logrado costos de generación récord. Estos enfoques han permitido que proyectos de gran escala reduzcan costos operativos y logren mayor rentabilidad, estableciendo referencias para el futuro desarrollo de la industria solar.

Estructuración financiera y sostenibilidad

La viabilidad financiera de estos proyectos requiere modelos dinámicos que integren riesgos regulatorios y fluctuaciones de mercado. El uso de opciones reales, como el método binomial y Black-Scholes, permite valorar flexibilidades estratégicas, como ampliaciones de capacidad o ventas anticipadas de activos. En el sector salud colombiano, esta metodología elevó la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 9.7% al 14.3% comparado con enfoques tradicionales como el VAN. (Carvajal Rojas & Varela Varela, 2021)

Los modelos más comunes en la financiación de plantas solares incluyen el **Project Finance**, el **leasing financiero**, **asociaciones público-privadas** (PPA por sus siglas en inglés), **bonos verdes** y mecanismos de **blended finance** promovidos por organismos multilaterales, dichos modelos han permitido el apalancamiento financiero y atracción de capital público y

privado. A continuación, se describen dichos modelos de estructuración financiera, junto con ejemplos reales de aplicación exitosa:

- **Project Finance:** Es un modelo de financiación estructurada donde los recursos necesarios para el proyecto provienen principalmente de préstamos garantizados por los flujos de caja esperados del propio proyecto, en lugar de los activos o balance del patrocinador. Su mayor ventaja es que aísla el riesgo financiero del patrocinador y permite mayor apalancamiento financiero. Un ejemplo de éxito es el parque solar Villanueva (México, 828 MW), el cual fue financiado a través de esta modalidad con respaldo de contratos PPA a largo plazo otorgados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en subastas públicas y desarrollado por Enel Green Power, atrayendo inversión internacional mediante mecanismos bancables. (Inter-American Development Bank, 2016)

- **Leasing Financiero (Arrendamiento financiero):** Es un modelo donde un desarrollador (arrendatario) adquiere el derecho de uso de equipos o infraestructura mediante pagos periódicos a una entidad financiera (arrendador), con opción de compra al finalizar el contrato. Su mayor ventaja es que permite desarrollar el proyecto sin una gran inversión inicial de capital. Como ejemplo de éxito está el proyecto solar SunEdison en India (5 MW), el cual fue financiado bajo dicha modalidad con equipos provistos por Tata Capital, permitiendo a SunEdison construir sin incurrir en altos costos de adquisición inicial. (PR Newswire, 2025)

- **Asociaciones Público-Privadas (PPA):** Se definen como acuerdos de colaboración entre una entidad gubernamental y un privado para desarrollar infraestructuras donde el privado asume el financiamiento, la construcción y operación, recibiendo retorno mediante pagos del gobierno o ingresos generados, esta modalidad facilita el acceso a grandes proyectos en países en desarrollo con respaldo estatal. Podemos ver el del parque solar Escatrón en España (300 MW), este fue

desarrollado bajo un esquema APP con participación del Ayuntamiento de Zaragoza y un consorcio liderado por Grupo Cobra, facilitando acceso a terrenos y permisos mediante colaboración institucional. (Energías Renovables, 2024)

- **Blended Finance (Financiamiento combinado):** Es un mecanismo que combina fondos públicos, filantrópicos y privados para reducir el riesgo percibido en inversiones sostenibles, incentivando la entrada de capital privado. Su ventaja clave es que permite movilizar grandes inversiones en contextos de riesgo alto. Como ejemplo de éxito está el proyecto Benban en Egipto con una potencia de 1.6 GW, uno de los mayores complejos solares del mundo, financiado entre IFC, EBRD, el Fondo Verde para el Clima (GCF) y capital privado. (IFC, 2017)

- **Bonos Verdes:** Estos son instrumentos financieros emitidos para recaudar fondos específicamente destinados a proyectos con beneficios ambientales, como plantas solares. Están respaldados por políticas ESG (Ambientales, Sociales y de Gobernanza). Su principal ventaja es dar acceso a capital con condiciones preferenciales y reputación mejorada ante inversores sostenibles. Como ejemplo exitoso fue la granja solar Kiamal (Australia, 256 MW), este proyecto fue financiado parcialmente con bonos verdes emitidos por Infradebt. Su éxito se convirtió en referencia en Oceanía por integrar criterios de sostenibilidad y generar reportes verificados de impacto ambiental. (Renew Economy, 2019)

Prácticas sostenibles y su impacto

La gestión de proyectos fotovoltaicos bajo enfoques predictivos y ciclos de vida en cascada requiere una integración estructural de prácticas sostenibles en cada fase del proceso. Este enfoque garantiza no solo el cumplimiento de objetivos ambientales, sino también la optimización de la eficiencia operativa y la reducción de riesgos financieros. En este ítem se analiza cómo las prácticas sostenibles se articulan con metodologías de gestión mencionadas,

considerando variables asociadas a productos de tecnología fotovoltaica, a la ejecución de proyecto y a la organización.

Se deben identificar prácticas sostenibles desde la **fase de planificación**, dado a que la selección de ubicaciones con criterios de sostenibilidad es fundamental para minimizar impactos ambientales y maximizar la eficiencia energética. Estudios demuestran que proyectos que integran análisis de irradiación solar, biodiversidad local y usos complementarios del suelo (como agrovoltaica) reducen conflictos sociales y aumentan la aceptación comunitaria. Por ejemplo, en España, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) exige que el 0.2% del territorio cultivable se destine a proyectos fotovoltaicos, priorizando terrenos degradados o de bajo valor agrícola para evitar la competencia con la producción alimentaria. (Ingenia Global Energy, s.f.)

La metodología en cascada permite incorporar estos criterios desde la fase inicial es mediante **modelos predictivos de uso de suelo**, las cuales son herramientas técnicas como SIG (Sistemas de Información Geográfica), donde se evalúan la compatibilidad territorial, identificando zonas con alta irradiación y baja sensibilidad ecológica. También se han desarrollado **simulaciones de impacto ambiental** desarrollados con algoritmos de aprendizaje automático donde se proyectan efectos a largo plazo en la fauna y flora, como el estudio de la Universidad de Castilla-La Mancha (2021), que evidenció la recuperación de suelos en plantas fotovoltaicas, alcanzando un equilibrio similar a ecosistemas forestales tras 5 años de operación. (Ingenia Global Energy, s.f.)

Estas prácticas se alinean con variables del producto específicamente en la eficiencia de paneles en diferentes condiciones climáticas y variables de costos de mitigación ambiental para

el proyecto, demostrando que una planificación predictiva reduce hasta un 30% los sobrecostos por compensaciones ecológicas. (RCCI, 2022)

El **diseño técnico** de plantas fotovoltaicas con **enfoque en el ciclo de vida** bajo criterios de economía circular y eficiencia energética exige **metodologías que anticipen el desempeño técnico y ambiental**. Un ejemplo es la **metodología SEPLAN**, aplicada en Cajamarca (Perú), que integra modelos multicriterio para priorizar tecnologías de bajo impacto, como paneles bifaciales y estructuras reciclables, asegurando una reducción del 40% en huella de carbono comparado con diseños convencionales. Las variables clave en esta fase son la vida útil del **producto**, que en este caso son los módulos la cual es mayor a 25 años y su capacidad de reciclaje tiene un 85% de materiales recuperables, según estándares IEC 62446. (IEA, s.f.)

La siguiente variable del ciclo de vida es el **proyecto** mismo, pues durante su fase de operación se pueden implementar herramientas con el **uso de algoritmos K-Means y K-NN** para agrupar datos de irradiancia y predecir fallos en inversores, optimizando el mantenimiento predictivo y reduciendo pérdidas energéticas en un 15%. (RTE, 2023)

La última variable que podemos encontrar para el ciclo de vida es la **organización**, con el fin de mantener operando los proyectos y seguir en el mercado de energías renovables, las organizaciones deben buscar **certificaciones** como **LEED** o **BREEAM**, que exigen auditorías continuas de sostenibilidad, vinculadas a cláusulas contractuales en acuerdos EPC.

Pasando a la fase de **Ejecución y Monitoreo** requiere del uso de herramientas predictivas que equilibren la eficiencia técnica con la sostenibilidad. En proyectos como Villanueva Solar Park en México, se implementaron robots autónomos para la instalación de paneles, reduciendo

un 25% el consumo de agua y un 18% la huella de carbono versus métodos tradicionales.

(Universidad de Los Andes, s.f.)

Se han desarrollado **metodologías aplicables** para el **control predictivo de emisiones** usando modelos dinámicos basados en ecuaciones de transferencia de calor, donde se monitorean en tiempo real la temperatura de módulos, ajustando su inclinación para minimizar el estrés térmico y prolongar su vida útil. (RCCI, 2022)

En las fases constructivas se pueden aplicar metodologías en la **gestión de residuos** utilizando **plataformas IoT** (Internet de las cosas), las cuales rastrean el 100% de los desechos generados, vinculándolos a programas de reutilización como el vidrio de paneles en construcción de carreteras, y así lograr tasa de valorización de hasta el 92%. (IEA, s.f.)

Estas prácticas impactan directamente en variables de la organización, como la reputación corporativa y al mismo tiempo aumentando sus índices organizacionales, esto viene de la mano con el acceso a financiamiento verde donde las tasas de interés son menores en bonos climáticos.

Es momento de analizar que metodologías y practicas general **impacto en la eficiencia y efectividad** de estos proyectos, por lo cual se debe adoptar la integración de sostenibilidad en metodologías predictivas que generen beneficios cuantificables. Por ejemplo, tenemos que la **reducción de costos operativos** en plantas con sistemas de limpieza automatizada con el uso de drones o robots de limpieza impacta el rendimiento energético aumentando hasta un 25%, mientras los costos de mantenimiento disminuyen un 30%. (Revista Contacto, s.f.)

También existen prácticas para la **mitigación de riesgos legales**, los proyectos que aplican estándares en **evaluación de impacto social** reportan un 45% menos de litigios por

conflictos comunitarios. (UGHW, s.f.), otra de las practicas fundamentales es la **optimización financiera**, aplicando modelos de blended finance combinando fondos públicos y privados reducen el WACC (Costo Promedio Ponderado de Capital) del 8% al 6.2%, mejorando la TIR (Tasa Interna de Retorno) en 3.5 puntos porcentuales. (Viindoo, s.f.)

Las prácticas sostenibles que se articulan con metodologías predictivas y ciclos de vida en cascada transforman la gestión de proyectos en un proceso holístico. Este enfoque no solo asegura el cumplimiento normativo y ambiental, sino que también maximiza la eficiencia operativa mediante la anticipación de riesgos y la optimización de recursos. La experiencia en los proyectos mencionados evidencia que la sostenibilidad no es un costo adicional, sino un motor de innovación y rentabilidad en la era de la transición energética.

Metodologías técnicas y su influencia

En este ítem vamos a abordar una comparativa de diferentes metodologías técnicas y su influencia en la gestión predictiva de los proyectos fotovoltaicos, donde veremos como se integran los enfoques de predicción en los ciclos de vida estructurados.

Iniciamos con la **metodología Waterfall** (Asana, 2025) y su adaptación a los proyectos de energías renovables, este modelo estructura los proyectos en **fases secuenciales**; primero evalúa los requisitos, luego estructura el diseño para después pasar a la ejecución, después de completado se establece una verificación y se finaliza con el mantenimiento según las necesidades del servicio, este sistema de trabajo es ideal para entornos con requisitos estables y alta predictibilidad. En proyectos fotovoltaicos, esta metodología garantiza una planificación detallada de variables técnicas como la orientación de paneles, capacidad de inversores y análisis de sombreado antes de iniciar la construcción. Por ejemplo, en el proyecto Benban Solar Park

mencionado anteriormente, la fase de diseño incluyó simulaciones termodinámicas para predecir el rendimiento de los módulos bajo condiciones desérticas, reduciendo un 18% las pérdidas por sobrecalentamiento. (IJSER, s.f.)

Otra metodología aplicable a este rubro de proyectos es **PRINCE2**, la cual se especializa en la gestión por productos en lugar de actividades, esto es clave para proyectos fotovoltaicos donde los entregables son de tipo técnico; como, por ejemplo, módulos, inversores, sistemas de monitorización, entre otros; los cuales deben cumplir especificaciones rigurosas. En el proyecto IKEA San Sebastián de los Reyes (España), se aplicaron los 7 principios de PRINCE2, destacándose la justificación comercial continua, cada fase requería validar que los paneles bifaciales seleccionados mantuvieran una eficiencia $\geq 21.5\%$ bajo condiciones reales. (Iraragorri, 2022)

Lean Construction es una metodología aplicada en Bhadla Solar Park en India busco la minimización de recursos, reduciendo un 22% los residuos de acero y aluminio mediante técnicas como JIT (Just-in-Time) para la entrega de módulos. Al priorizar la eficiencia en el uso de materiales, se logró un índice de aprovechamiento del 94% en estructuras de soporte, impactando positivamente en el Costo Nivelado de Energía (LCOE). El enfoque metodológico Lean aplicado a la construcción busca reducir costos, tiempos y recursos, al mismo tiempo busca mejorar la calidad y la seguridad de las obras. Este método tiene tres pilares fundamentales: la reducción de desperdicios, la planificación colaborativa y el control detallado de cada una de las fases del proyecto. (Orkli, S.Coop, 2025)

Las metodologías técnicas analizadas demuestran que la integración de enfoques predictivos, como Waterfall, PRINCE2 y Lean Construction, con herramientas avanzadas como

gemelos digitales, FMEA o EVM, tienen el potencial de optimizar la gestión de proyectos fotovoltaicos en tres dimensiones:

- Producto: Aumento de la eficiencia de módulos y vida útil de inversores.
- Proyecto: Reducción en tiempos de instalación y costos operativos.
- Organización: Mejora los índices ESG y acceso a financiamiento verde con tasas preferenciales.

Estas prácticas, validadas en los proyectos que se han mencionado en este capítulo y luego de un benchmarking general, confirman que la técnica no es un gasto, sino un motor para tener éxito en la competitividad de la transición energética.

Estrategias para la optimización de la planificación, ejecución y seguimiento de proyectos fotovoltaicos

En este apartado se presentaran un conjunto de estrategias y recomendaciones orientadas a optimizar la planificación, ejecución y seguimiento de proyectos fotovoltaicos de gran escala, integrando herramientas y enfoques que permiten anticipar y abordar los desafíos técnicos, económicos y ambientales identificados anteriormente; el objetivo es maximizar la viabilidad y sostenibilidad de estos proyectos mediante una gestión estratégica y colaborativa, basada en las mejores prácticas internacionales, asegurando el éxito y la competitividad en un entorno energético dinámico y exigente.

Planificación estratégica

La planificación estratégica constituye el eje articulador que integra variables económicas, técnicas y ambientales. Este proceso requiere una visión holística basada en metodologías predictivas y herramientas de análisis espacial, buscando priorizar la identificación de rutas de desarrollo y la evaluación de impactos socioambientales.

Para la fase inicial se recomienda la **selección estratégica de ubicaciones** para desarrollar los proyectos con un enfoque a su ciclo de vida. Dado a que la optimización comienza con criterios avanzados de ubicación que superan el mero análisis de irradiación solar. El Global Solar Atlas del Banco Mundial proporciona modelos geoespaciales que integran variables técnicas como la radiación difusa/directa y pendiente del terreno para minimizar costos de cimentación. También proporcionan información de los factores socioeconómicos donde se puede identificar la proximidad a comunidades con índices de electrificación <85% para sinergias con programas de desarrollo local, además esta herramienta nos muestra las

restricciones ambientales en términos de evasión de corredores biológicos críticos mediante sistemas SIG. (World Bank Group, s.f.)

Otra recomendación que se debe adoptar en la planificación es la estandarización de **diseños de arquitecturas flexibles**, se debe considerar ante la volatilidad de los mercados eléctricos que las estructuras tengan la capacidad de adaptarse a cambios regulatorios y tecnológicos. Un ejemplo muy claro es el estándar SEPLAN, implementada en proyectos mexicanos, la cual propone módulos intercambiables que tengan uso de inversores con compatibilidad forward para tecnologías emergentes. Otro ejemplo es dejar reservas estratégicas de terreno de al menos el 15% del área total para futuras expansiones o integración de almacenamiento con BESS. (PROMEXICO, s.f.)

Un factor muy importante que se debe contemplar en esta primera etapa es adoptar **modelos predictivos para la gestión de riesgo**. Para esto existe la aplicación de **análisis modal de fallos y efectos** o FMEA por sus siglas en inglés, esta herramienta metodológica ayuda a mitigar riesgos críticos como las fluctuaciones cambiarias para que el CAPEX se mantenga en un impacto de $\pm 20\%$ por medio de contratos forward con cláusulas de ajuste. Esta herramienta de análisis también permite identificar la variable con respecto a cambios regulatorios, con el propósito de minimizar el impacto en el retraso de permisos de construcción u operación, esta estrategia de mitigación se lleva a cabo dejando colchones para fondos de contingencia de 8% del presupuesto. Y por último el análisis modal indica que los conflictos comunitarios son una variable que tiene un potencial impacto en la paralización obras, aquí se recomienda realizar acuerdos previos con compensaciones del 0,5% de ingresos. (T&DWorld, s.f.)

La implementación de estas estrategias permite una simulación que permite reducir la exposición a riesgos financieros, tiempos de ejecución y cumplimiento de estándares de calidad.

Para llevar a cabo una planificación estratégica más efectiva se debe contemplar la **integración de los stakeholders**, esto con el fin de realizar prácticas de planificación mediante **plataformas colaborativas**, dentro de estos mecanismos de participación se desatacan las **mesas técnicas multisectoriales**, integradas por ministerios de ambiente y energías, gremios industriales y ONGs locales desde la fase de pre-factibilidad. También se deben crear espacios de socialización hacia la comunidad y autoridades locales donde se piensan ejecutar los proyectos, por medio de **sistemas de monitoreo participativo** como aplicaciones móviles, páginas web, talleres o redes sociales con actualización en tiempo real de métricas ambientales. Estas estrategias permiten el incremento en la aceptación social permitiendo afectar positivamente todos los involucrados y a los proyectos. (U.S. Department of Energy, s.f.)

La planificación debe incorporar principios de **economía circular** mediante en la **cadena de suministros**, por medio de contratos de recuperación de materiales donde se implementen cláusulas que obligan a fabricantes a recolectar el 85% de paneles al final de su vida útil. Además, se debe contar con Hubs logísticos regionales que permitan el almacenamiento compartido de componentes críticos y equipos principales, para reducir costos de inventario. (BRE National Solar Center, s.f.)

La planificación estratégica va más allá de la ubicación geográfica, requiere de modelos dinámicos que anticipen cambios tecnológicos, regulatorios y sociales. La integración de herramientas predictivas, plataformas colaborativas y diseños modulares demuestra reducciones significativas en sobre costos y tiempos de ejecución. Estos avances posicionan a la energía solar como columna vertebral de transiciones energética justas y técnicamente viables.

Gestión financiera y económica

La gestión financiera requiere un equilibrio entre mecanismos innovadores de financiamiento, mitigación de riesgos y optimización de costos. Este apartado propone estrategias alineadas con el objetivo de maximizar la viabilidad económica con herramientas validadas en mercados emergentes.

Las empresas de desarrollo de energías renovables deben contar con **estructuras financieras híbridas y acceso a capital verde**, esta combinación de fuentes públicas y privadas mediante financiamiento combinado ha demostrado reducir el costo de capital en un 20-30% en proyectos de países en desarrollo. Dichos programas de financiamiento deben integrar garantías parciales de entre el 15 al 25% del CAPEX con deuda comercial a tasas preferenciales, para lograr que el WACC se mantenga por debajo de financiamientos convencionales. Las ventajas de estos modelos financieros es atraer inversionistas institucionales como fondos de pensiones y aseguradoras, que aportan capital paciente a plazos de 20-25 años, con retornos ajustados a perfiles de riesgo ESG. Otra de sus ventajas es el instrumento de crédito con cláusulas de desempeño, es decir que, se otorgan bonos ligados a indicadores de generación y que reducen tasas de interés. (IFC, s.f.)

Estos modelos financieros permiten a las empresas tener mayor capitalización y participación en el mercado, permitiendo un crecimiento exponencial más rápido sin arriesgar patrimonio. Esto les permite llegar a mercados de nivel global, expansión a otros continentes y desarrollar modelos financieros mas estables y de menor riesgo.

Los modelos económicos de las empresas desarrolladores de proyectos solares deben contar con una **gestión de riesgos** mediante **instrumentos derivados y seguros**, dado a la

volatilidad de precios en componentes críticos, equipos principales y electricidad, se exige adoptar estrategias activas que cubran los riesgos asociados a estos. Las estrategias sugeridas para asegurar los presupuestos de los proyectos es la implementación de contratos forward para insumos, que permiten fijar precios mediante acuerdos a cierta cantidad de tiempo con cláusulas de force majeure (fuerza mayor) extendidas a crisis geopolíticas. Además, se deben buscar opciones financieras en mercados eléctricos que permitan comprar puts para establecer pisos de ingresos cuando los precios spot caen bajo el umbral del PPA (Power Purchase Agreement). En el ámbito asegurador, se deben adquirir siempre pólizas especializadas para energía solar, donde se incluyan coberturas contra degradación acelerada de paneles con cláusulas de indemnización bajo cierto porcentaje del costo de reposición si la eficiencia cae a una cantidad específica %/año. (SolarQuarter, s.f.)

También se debe adoptar una política que busque la **reducción del Costo Nivelado de Energía** (LCOE) en proyectos fotovoltaicos, este objetivo se puede lograr mediante tres estrategias clave: **subsídios dirigidos** como el Investment Tax Credit del 30% en EE.UU., que reduce el LCOE a 24 USD/MWh, economías de escala mediante **licitaciones agregadas de componentes** donde se han visto ahorros del 12-18% en consorcios como SolarEnergy, y **bonos verdes certificados** que movilizan capital hacia activos operativos. Estas se complementan con **PPAs dinámicos** que integran cláusulas de repotenciación anticipada y participación en mercados spot, equilibrando estabilidad y maximización de ingresos. Según un análisis de IRENA en 2023, estas sinergias han reducido el LCOE solar en un 89% desde 2010, proyectando una disminución adicional del 31% para 2035, posicionando a la energía solar como una opción técnico-económicamente viable. (PV Magazine, 2023)

La gestión financiera exige un enfoque multidimensional que combine instrumentos innovadores, coberturas activas de riesgos y optimización técnica del LCOE. Estas estrategias permiten estructurar financiamientos con ratios deuda/capital de 80/20, aprovechando subsidios y certificaciones ESG. Al mismo tiempo esta ruta de optimización permite reducir el WACC y aumentar la TIR del proyecto en varios puntos porcentuales. Todo esto no permite mejorar la viabilidad económica, sino que posicionan a la energía solar como eje de transiciones energéticas financieramente sostenibles.

Ejecución técnica eficiente

La ejecución de los proyectos requiere la convergencia de innovaciones tecnológicas, modelos colaborativos y estándares de calidad certificados. Este apartado propone estrategias validadas en proyectos internacionales, alineadas con el objetivo de maximizar la viabilidad técnica mediante la reducción de tiempos de construcción, la optimización de recursos y la garantía de desempeño energético.

La primera estrategia es la **automatización** en la instalación con **robots guiados por IA**, la robotización de procesos críticos como el montaje de paneles y estructuras ha demostrado reducir los tiempos de construcción en un 40% frente a métodos manuales, además la implementación de sistemas de visión artificial ha permitido la identificación precisa de soportes estructurales con margen de error ≤ 2 mm, utilizando cámaras 3D LiDAR y algoritmos de reconocimiento de patrones. Los brazos robóticos adaptables o también conocidos trackers permiten ajustar automáticamente de la inclinación de las mesas según coordenadas GPS y datos de irradiación local. Este enfoque tecnológico no solo ha reducido costos laborales, sino que minimiza riesgos de microgrietas durante la instalación de módulos solares, garantizando una vida útil de los paneles ≥ 28 años. (PV Magazine, s.f.)

La **integración de Building Information Modeling (BIM)** en fases de diseño y construcción permite detectar conflictos geométricos y optimizar flujos de trabajo. Este modelo tiene la ventaja de centralizar datos estructurales que dan paso al análisis de cargas en tiempo real para estructuras de soporte expuestas a esfuerzos mecánicos. Además, el modelado permite realizar simulaciones energéticas donde se puede calcular el sombreado dinámico mediante algoritmos ray tracing, ajustando la disposición de strings para maximizar el performance ratio. (BibLus, s.f.)

La implementación de la metodología **Lean Construction** aplicado a flujos de trabajo permite optimizar la secuencia de actividades mediante **Planificación pull**: Asignación diaria de tareas basada en restricciones reales como la disponibilidad de materiales o condiciones climáticas. Sumar a la planificación un **control adecuado y estandarizado** mediante formatos establecidos, con el fin de hacer seguimiento a **indicadores KPI**: Estos permiten medir el avance, las cantidades, fechas, material y desviaciones con correcciones en tiempo real mediante dashboards. Este enfoque metodológico logra reducir los tiempos muertos y los desperdicios de material, logrando una tasa de utilización de recursos muy alta y generar desviaciones positivas al presupuesto total asignado. (Corredor & Rojano, s.f.)

Las empresas deben adoptar **sistemas de montaje mecánico estandarizados y prefabricados**, con el fin de llevar a cabo ensambles más rápidos para la **aceleración de las obras**, esto debe estar de la mano con los proveedores y fabricantes de estructuras, puesto que el stock es primordial para eventualidades que puedan surgir durante los procesos de construcción, y así no afectar el cronograma. Manejar estructuras tipo **plug-and-play** con uniones atornilladas con tolerancia en milímetros, compatibles con varias referencias de paneles. También se debe contemplar la adquisición de módulos solares estandarizados que incluyan cables MC4

preensamblados y conectores IP68, con la finalidad de reducir los tiempos de cableado. Estas soluciones han demostrado ser más rápidas que métodos tradicionales. (BayWa r.e. México, s.f.)

Es muy importante siempre contemplar en el alcance de los proyectos como se debe realizar el **monitoreo en tiempo real**, para ello existen plataformas como GIRASOL, desarrollada por el CIT UPC, la cual integra sensores IoT y modelos predictivos para detección temprana de fallos, donde se realiza un análisis de curvas I-V en inversores con precisión del 99.7%, identificando pérdidas por degradación en menos de 24 horas. Este sistema también contempla la optimización dinámica para el ajuste automático del ángulo de seguidores solares basado en pronósticos de nubosidad. (Centro de Innovación y Tecnología UPC, s.f.)

En las actividades de Comisionamiento se recomienda adoptar estándares ISO específicamente bajo la norma 55000, esta metodología de cuatro fases propuesta por Correa & Franco en 2021 garantiza la entrega de plantas con disponibilidad $\geq 98\%$, donde primero se realiza la taxonomía ISO 14224 donde se clasifican los componentes críticos tales como inversores, transformadores, celdas MT, entre otros, determinados según tasa de fallos históricos. Dentro de estas actividades se debe priorizar el mantenimiento en equipos usando métodos como Risk Priority Number (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) que se basan en el análisis de criticidad de la norma ISO 31000, dicho método de RCM implementado en otros proyectos propone que se realice una programación de inspecciones termográficas cada 3 meses para módulos con temperatura $>75^{\circ}\text{C}$. por último se deben realizar auditorías bianuales de gestión de activos alineadas con la ISO 55001, vinculadas a cláusulas de garantía extendida. (Correa & Franco Cardona, 2021)

La ejecución técnica eficiente se puede lograr mediante la sinergia entre automatización, modelado BIM/LPS, prefabricación modular y gemelos digitales. Casos de éxito que reducen

los tiempos de construcción en un 45%, incrementan la vida útil de los equipos a 30+ años y aseguran mejor producción energética. La adopción de estándares ISO en comisionamiento y mantenimiento predictivo garantiza una reducción del 25% en OPEX durante la fase operativa, consolidando a la energía solar como la opción técnico-económica más viable para la transición energética global.

Gestión de costos operativos

La gestión de costos operativos (OPEX) es un factor crítico para garantizar la rentabilidad a largo plazo, siendo responsabilidad de los procesos de AOM (Administración, Operación y Mantenimiento). Este apartado propone estrategias basadas en tecnologías avanzadas, modelos predictivos y prácticas estandarizadas, alineadas con el objetivo de optimizar la viabilidad económica y técnica mediante la reducción de pérdidas energéticas, la extensión de la vida útil de los equipos y la integración de soluciones innovadoras.

Una de las estrategias más actuales e innovadoras es la implementación de **mantenimiento predictivo** mediante **Inteligencia Artificial** y **IoT** (Internet de las Cosas). Estas tecnologías realizan monitoreo en tiempo real, permiten anticipar fallas en componentes críticos como inversores, transformadores y cables de conexión. En el parque solar Benban (Egipto), la implementación de sensores IoT en el 100% de los inversores redujo las paradas no planificadas en un 40%, aumentando la disponibilidad operativa a 98.7%. Estos sistemas **analizan variables** como temperatura de módulos donde se detectan hotspots (puntos calientes) mediante termografía infrarroja, con una precisión de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, evitando degradaciones aceleradas. También analizan vibraciones en la estructura por medio de sensores piezoeléctricos que identifican desajustes en seguidores solares, corrigiéndolos antes de que afecten la alineación óptima. Además, la integración de gemelos digitales, como en el proyecto GIRASOL II (España), simula

el comportamiento de la planta bajo diferentes escenarios climáticos, optimizando los ciclos de mantenimiento y reduciendo los costos OPEX. (Montel Group, s.f.)

Para el mantenimiento de los sistemas se propone implementar procesos de **limpieza automatizada** y metodologías técnicas para la **gestión de pérdidas por suciedad**. Puesto que, la acumulación de polvo, polen y residuos orgánicos puede reducir la generación energética hasta en 12% en zonas áridas. Soluciones como SolarCleano, combinan robots autónomos con cepillos de microfibras y sistemas de aire comprimido, que logran reducir hasta un 90% el uso de agua, estas tecnologías son de gran ayuda en desiertos y áreas con estrés hídrico. Estas soluciones se recomiendan realizar en limpieza nocturna con el fin de evitar sombras durante horas de generación. Estos sistemas se integran con **plataformas de gestión** que priorizan las áreas críticas mediante algoritmos de clustering (K-Means), su uso permite el análisis de datos no supervisado y que en este caso particular proponen rutas optimizadas de seguimiento y frecuencia de limpieza según datos históricos de irradiancia y acumulación de partículas. (FINE Engineering, 2021)

Desde una posición **administrativa y legal**, se debe establecer **políticas internas** para **optimización de costos** mediante **contratos de O&M Dinámicos**, modelos como "cost-plus", recomendado por SolarPower Europe, vincula el pago de servicios de mantenimiento al desempeño real de la planta. En el contrato del parque Noor Abu Dhabi, se establecieron bonificaciones por alcanzar un performance ratio $\geq 85\%$ y penalizaciones por caídas $> 2\%$ en la generación esperada. Este tipo de enfoques permite tener tarifas variables por disponibilidad, para que los pagos sean ajustados al porcentaje de operación porcentual de la generación de energía. Dentro de dichos contratos se recomienda establecer cláusulas de repotenciación

anticipada, es decir, crear una reserva del 0.8% de los ingresos anuales para reemplazar inversores con eficiencia <98% antes de cumplir su vida útil. (SolarPower Europe, 2025)

La **implementación de drones** es una estrategia que ha surgido con el fin de realizar **inspecciones más eficientes**, esto ha permitido crear **análisis multiespectral**, por ejemplo, la termografía con drones equipados con cámaras FLIR A65 **reduce los tiempos de inspección** en un 400% comparado con métodos manuales. En el Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park (EAU), drones mapearon 900,000 paneles en 5 días, permitiendo identificar 1,200 conexiones flojas en strings, dando paso a un mantenimiento correctivo que evitó pérdidas de 2.4 GWh/año. También existen algoritmos para detección temprana de microfracturas como YOLOv5 con una precisión del 92%, los datos que analiza el algoritmo se pueden integrar a plataformas BIM, generando modelos 4D que predicen la degradación de materiales y planifican intervenciones con antelación. (FEDS Group, 2024)

Establecer tecnologías de **gestión de almacenamiento** para **mitigar la intermitencia** por medio de la integración de baterías de flujo permite almacenar excedentes diurnos para suplir demandas nocturnas, reduciendo la dependencia de fuentes térmicas auxiliares, este enfoque disminuye los costos de balanceo de red. Estas soluciones incluyen estrategias como, **cargado diferido inteligente**: Algoritmos que priorizan la carga durante picos de generación maximizando el uso de infraestructura existente. También permite la participación en mercados ancillary (o auxiliares), donde se permite la venta de servicios de regulación de frecuencia, generando ingresos extras a las empresas de generación energética. (Abdulla, Sleptchenko, & Nayfeh, s.f.)

La gestión avanzada de costos operativos, mediante tecnologías como IA, drones y contratos basados en desempeño, reduce el OPEX promedio de proyectos fotovoltaicos en

comparación a métodos tradicionales. Además mejoran la rentabilidad y extienden la vida útil de los equipos por más de 35 años, posicionando a la energía solar como la opción más competitiva para la transición energética.

Sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo

La integración de criterios de sostenibilidad no solo garantiza el cumplimiento ambiental, sino que también maximiza la rentabilidad a largo plazo mediante la reducción de costos operativos, la extensión de la vida útil de los activos y el acceso a financiamiento verde. Esta sección propone estrategias validadas en proyectos internacionales, alineadas con el objetivo de optimizar la viabilidad económica, técnica y ambiental mediante modelos circulares, repotenciación y sinergias socioambientales.

La adopción de políticas internas basadas en **economía circular**, dan origen a estrategias para manejar el **ciclo de vida de los paneles solares**, esta propuesta indica que el reciclaje de paneles fotovoltaicos es clave para reducir la dependencia de materiales primarios y minimizar residuos tóxicos. Bajo el reglamento de la Unión Europea (2012), los fabricantes deben recuperar el 85% de los componentes, permitiendo la **recuperación de materiales** como de silicio y plata, por medio de técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas permiten reutilizar el 95% del silicio en nuevos módulos, reduciendo el costo de materia prima en un 30%. También se puede implementar soluciones para la **gestión de materiales críticos**, un ejemplo es la empresa Iberdrola, la cual ha implementado cadenas logísticas inversas para extraer cadmio y plomo de paneles obsoletos, evitando la contaminación de suelos. (Iberdrola, s.f.)

La **repotenciación** de plantas fotovoltaicas significa la actualización de equipos principales y estructuras, esta **estrategia de sostenibilidad técnica** es una solución que aumenta

la eficiencia energética y extiende la vida útil de los activos. No solo es reemplazar los componentes, también se debe revisar tecnologías actuales que permitan mayor tolerancia a temperaturas extremas y reducción de pérdidas de energía, buscando una mejor eficiencia y calidad. Es muy importante establecer con los clientes que se debe hacer con los excedentes, puesto que pueden llegar a representar un retorno de inversión acelerado por venta de excedentes en mercados spot. (ESA, s.f.)

Existen maneras de aprovechar los terrenos de las granjas solares, a través de la combinación de **agricultura y generación fotovoltaica** se puede optimizar el uso del territorio y generar ingresos complementarios. Por ejemplo, en el proyecto Fraunhofer ISE en Alemania, sembraron cultivos de hortalizas bajo paneles bifaciales, mostrando un aumento del 10% en rendimiento agrícola, dado al microclima creado por el sombreado parcial que redujo la evaporación y el estrés hídrico. El resultado fue ingresos adicionales de 560.000 €/año por la venta simultánea de energía y productos agrícolas. (Metal Frame Renovables, s.f.)

Además de la estrategia financiera de bonos verdes, existe una metodología que permite sostenibilidad y rentabilidad financiera a largo plazo, la estrategia radica en los **mercados de carbono** donde bancos como BBVA tienen programas **Green Loans** (Prestamos verdes), trata de préstamos indexados al cumplimiento de indicadores como Carbon Intensity Ratio (< 50 tCO₂/MWh), donde el objetivo es la reducción del 0.5% en la tasa de interés por cada meta alcanzada. Además, la participación en mercados voluntarios de carbono como Verra VCS, puede llegar a generar ingresos extras de \$18 a 25 dólares por tonelada de CO₂ evitada, con proyectos certificados bajo metodologías como AMS-III.AJ. (BBVA, s.f.)

La **integración de corredores biológicos y prácticas de bajo impacto** en la construcción mitiga efectos negativos y mejora la aceptación social. En Noor Abu Dhabi (EAU),

se implementaron cubiertas vegetales nativos de *Cyperus conglomeratus* entre filas de paneles, aumentando la retención de suelo en un 40% y atrayendo polinizadores. También se construyeron sistemas de drenaje sostenible (SuDS, logrando la reducción del 90% en escorrentías contaminantes mediante zanjas filtrantes y humedales artificiales. La Universidad de Castilla-La Mancha realizó un estudio en 2021 demostrando que, tras 5 años de operación, los suelos en plantas fotovoltaicas recuperan un 70% de su biodiversidad original, aproximándose a ecosistemas forestales. (Ingenia Global Energy, s.f.)

La sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de los proyectos de energías renovables se garantizan mediante la sinergia entre economía circular, integración agrovoltaica y financiamiento verde. Estas estrategias, validadas en muchos casos de éxito, reducen el LCOE, extienden la vida útil de las plantas por más de 35 años y generan retornos sociales que refuerzan la licencia social para operar. La energía solar se consolida, así como un pilar técnico-económico y ambientalmente responsable de la transición energética global.

Conclusiones

La gestión eficiente de proyectos fotovoltaicos de gran escala requiere un enfoque integral que articule variables técnicas, económicas, financieras, regulatorias y socioambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. El análisis realizado evidencia que, desde la selección estratégica de la ubicación, considerando irradiación solar, topografía, acceso a infraestructura eléctrica y factores socioambientales, es determinante para la viabilidad técnica y económica del proyecto. El uso de herramientas geoespaciales y análisis multicriterio permite minimizar riesgos y maximizar la eficiencia desde la etapa de prefactibilidad.

La intermitencia y variabilidad de la generación solar representan desafíos críticos para la integración a la red y el equilibrio oferta-demanda. La incorporación de sistemas de almacenamiento, gestión inteligente de la demanda y participación en mercados auxiliares son estrategias clave para garantizar la confiabilidad del suministro y la competitividad del proyecto.

El entorno financiero y regulatorio es uno de los principales factores de éxito o fracaso. Modelos innovadores de financiamiento, como project finance, leasing, asociaciones público-privadas y blended finance, junto con el acceso a capital verde y la gestión activa de riesgos, permiten reducir el costo de capital y aumentar la TIR, especialmente en mercados emergentes.

La optimización de costos, tanto en CAPEX como en OPEX, es posible mediante la estandarización de componentes, automatización de procesos constructivos, implementación de mantenimiento predictivo, y la adopción de contratos de O&M basados en desempeño. Estas prácticas, validadas en proyectos de referencia internacional, han demostrado reducciones significativas en tiempos y costos, así como incrementos en la disponibilidad operativa y vida útil de los activos.

La integración de criterios de sostenibilidad y economía circular no solo responde a exigencias normativas y sociales, sino que se traduce en ventajas competitivas, como la reducción de sobre costos por compensaciones ambientales, acceso a financiamiento preferencial, extensión de la vida útil de los equipos y generación de ingresos adicionales por reciclaje y mercados de carbono.

Las metodologías predictivas y de ciclo de vida estructurado específicamente Waterfall, PRINCE2, Lean Construction y herramientas digitales (BIM, gemelos digitales, plataformas colaborativas) permiten anticipar riesgos, optimizar recursos y asegurar el cumplimiento de estándares de calidad y sostenibilidad, posicionando a la energía solar como la opción más robusta para la transición energética global.

En síntesis, la eficiencia y efectividad en la ejecución de proyectos fotovoltaicos de gran escala depende de la capacidad de integrar innovación tecnológica, modelos financieros robustos, gestión avanzada de riesgos y sostenibilidad en cada fase del proyecto. La metodología propuesta en este trabajo proporciona un marco integral y adaptable para maximizar la viabilidad y el impacto positivo de la energía solar a gran escala.

Recomendaciones

A partir del análisis y benchmarking realizado, se recomienda a los actores involucrados en el desarrollo de proyectos fotovoltaicos de gran escala adoptar una planificación estratégica basada en herramientas predictivas y análisis multicriterio, integrando variables técnicas, regulatorias, sociales y ambientales desde la etapa de prefactibilidad. Utilizar sistemas de información geográfica y plataformas colaborativas para la toma de decisiones informada y participativa.

También se recomienda priorizar modelos de financiamiento híbridos y acceso a capital verde, estructurando proyectos bajo esquemas de project finance, leasing, APP y blended finance, que permitan mitigar riesgos y atraer inversiones a largo plazo. Gestionar activamente coberturas de riesgo mediante derivados, seguros especializados y contratos forward para insumos críticos.

Es muy importante implementar estándares internacionales de calidad y sostenibilidad (ISO 55000, LEED, BREEAM), así como certificaciones ESG, para asegurar el cumplimiento normativo, mejorar la reputación corporativa y acceder a financiamiento preferencial.

Las empresas deben buscar y optimizar la ejecución técnica mediante automatización, prefabricación y modelado digital (BIM), reduciendo tiempos de construcción, minimizando errores y asegurando la trazabilidad de los procesos. Integrar sistemas de monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo y gestión inteligente de activos para maximizar la disponibilidad operativa y reducir costos OPEX.

Deben adoptar dentro de su misión estrategias para fomentar la economía circular y la gestión sostenible de materiales, estableciendo contratos de recuperación de paneles y

componentes al final de su vida útil, promoviendo la reutilización y reciclaje de materiales críticos, y explorando sinergias agrovoltaicas para maximizar el uso del suelo y los retornos socioeconómicos.

Es muy importante aunar esfuerzos para desarrollar estrategias de integración social y ambiental, mediante la participación temprana de comunidades y stakeholders, implementación de corredores biológicos, gestión responsable de residuos y monitoreo participativo de impactos. Estas acciones reducen conflictos, mejoran la aceptación social y fortalecen la licencia social para operar.

El mejoramiento continuo es parte fundamental con el fin de actualizar continuamente la metodología de gestión, incorporando lecciones aprendidas, avances tecnológicos y cambios regulatorios. Fomentar la fidelización de colaboradores, crear escuelas de capacitación y certificación del personal en nuevas tecnologías, gestión de riesgos y sostenibilidad.

Estas recomendaciones, alineadas con las mejores prácticas internacionales, permitirán a los desarrolladores, inversionistas y autoridades maximizar la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad de los proyectos fotovoltaicos de gran escala, consolidando su papel como eje de la transición energética y el desarrollo sostenible.

Referencias

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (s.f.). *Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions*. Obtenido de ScienceDirect - ELSEVIER: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000650>
- Asana. (Febrero de 2025). *Qué es la metodología waterfall y cuándo utilizarla*. Obtenido de <https://asana.com/es/resources/waterfall-project-management-methodology>
- Banco Mundial. (s.f.). *Global Bank Group*. Obtenido de <https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/project-detail/P131256>
- BayWa r.e. México. (s.f.). *Sistemas de montaje prefabricados para instalaciones fotovoltaicas*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=kt1oN0z3N3M>
- BBVA. (s.f.). *Sostenibilidad - Préstamos verdes o green loan*. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/como-obtener-un-green-loan-o-prestamos-verdes-para-tu-empresa/>
- BibLus. (s.f.). *Editorial Team*. Obtenido de Instalación fotovoltaica: BIM en el diseño y la instalación: <https://biblus.accasoftware.com/es/instalacion-fotovoltaica-finalmente-el-bim-en-el-diseno-y-la-instalacion/>
- BRE National Solar Center. (s.f.). *Planning guidance for the development of large scale ground mounted solar PV systems*. Obtenido de https://files.bregroup.com/solar/KN5524_Planning_Guidance_reduced.pdf
- Cadena SER. (enero de 2024). *Cadena SER*. Obtenido de https://cadenaser.com/castillayleon/2025/01/27/alegan-contra-una-nueva-amenaza-solar-en-la-montana-palentina-radio-palencia/?utm_source=chatgpt.com
- Carvajal Rojas, D., & Varela Varela, H. (2021). *METODOLOGÍA PARA DETERMINAR Y EVALUAR LOS RIESGOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA TIPO FOTOVOLTAICA PARA VIVIENDAS UBICADAS EN ZONAS NO INTERCONECTADAS*. Obtenido de UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a05b3f1-636e-485e-b57f-e2132f495220/content>
- Centro de Innovación y Tecnología UPC. (s.f.). *GIRASOL: Gemelo digital de centrales solares fotovoltaicas*. Obtenido de <https://cit.upc.edu/es/portfolio-item/girasol-gemelo-digital-de-centrales-solares-fotovoltaicas/>
- CERRE. (octubre de 2024). *Centre on Regulation in Europe*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cerre.eu/wp-content/uploads/2024/10/CERRE_Speeding-up-Renewable-Energy-Permitting-in-Europe_FINAL.pdf

- Correa, E., & Franco Cardona, C. (2021). *Metodología para Mejorar el Comisionamiento de Plantas Nuevas Integrando las Normas ISO 55000:2014 y ISO 14224:2016, Caso de Estudio: Plantas de Generación Eléctrica Solar Fotovoltaica y Eólica*. Obtenido de Unilasallista Corporación Universitaria Editorial Lasallista: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v16n2/1909-0455-pml-16-02-136.pdf>
- Corredor, G., & Rojano, A. (s.f.). https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/550/digital_17994.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Obtenido de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/550/digital_17994.pdf?sequence=1&isAllowed=y: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/550/digital_17994.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cruz Carrascal, E., & de la Fuente Casal, P. (s.f.). *UNIVERSIDAD de VALLADOLID*. Obtenido de INVERSORES EN APLICACIONES FOTOVOLTAICAS: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/2561/PFC-P%2043%20;%2044.pdf;jsessionid=ACC711FE3A509726FDF0DB0DF10A5B25?sequence=1>
- Energética. (Enero de 2024). *Revista de Generación de Energía y Eficiencia Energética*. Obtenido de https://energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/actualmente-el-mercado-se-encuentra-saturado-debido-a-la-aprobacion-de-los-aproximadamente-25-gw-en-dias?utm_source=chatgpt.com
- Energías Renovables. (2024). *Media Kit*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/el-parque-solar-que-promete-140-000-20241226>
- Energy, U. D. (s.f.). *End-of-Life Management for Solar Photovoltaics*. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/solar/end-life-management-solar-photovoltaics>
- EPA. (s.f.). *Emplazamiento de plantas de energía renovable en tierras contaminadas y sitios mineros*. U.S: Environmental Protection Agency.
- ESA. (s.f.). *La Repotenciación en Plantas Fotovoltaicas: Optimizando el Futuro Energético*. Obtenido de Energía Solar Aplicada: <https://esasl.com/la-repotenciacion-en-plantas-fotovoltaicas-optimizando-el-futuro-energetico/>
- FEDS Group. (2024). *Leveraging Drone Technology for More Efficient Solar Panel Inspections*. Obtenido de <https://feds.group/leveraging-drone-technology-for-more-efficient-solar-panel-inspections/>
- FINE Engineering. (2021). *CASE STUDY: HOW SOLARCLEANO'S PRODUCTS DRIVE PRODUCTIVITY AND EFFICIENCY TO CLIENTS*. Obtenido de

<https://easyengineering.eu/case-study-how-do-solar-clean-products-drive-productivity-and-efficiency-to-clients/>

Fraunhofer ISE. (s.f.). *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*. Obtenido de <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications.html>

Guevara, J. A. (s.f.). *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES*. Obtenido de ALBERTO CARDOZO PIÑACÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6924/1/TESINA.pdf>

huffpost. (s.f.). *Huffpost*. Obtenido de https://www.huffingtonpost.es/life/consumo/adios-paneles-fotovoltaicos-convencionales-invierno-noruega-acaba-dar-leccion-ensenando-nueva-fuente-energia.html?utm_source=chatgpt.com

Iberdrola. (s.f.). *¿Cómo funciona el reciclaje de paneles solares?* Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica/reciclaje-paneles-solares>

IEA. (2024). *Integración de energía solar y eólica*. Obtenido de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind>

IEA. (septiembre de 2024). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind>

IEA. (s.f.). *Análisis de Ciclo de Vida Ambiental de la Electricidad de los Sistemas Fotovoltaicos*. Obtenido de <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/09/Task-12-Fact-Sheet-Spanish.pdf>

IFC. (2017). *International Finance Corporation*. Obtenido de World Bank Group: <https://www.ifc.org/en/stories/2010/benban-solar-park-egypt>

IFC. (s.f.). *International Finance Corporation*. Obtenido de Scaling Solar: The Complete Package: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/478221582537751050/pdf/Scaling-Solar-The-Complete-Package.pdf>

IJSER. (s.f.). *International Journal of Scientific Engineering and Research*. Obtenido de Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of a Rooftop PV System: <https://www.ijser.in/archives/v3i9/IJSER15469.pdf>

Ingenia Global Energy. (s.f.). Obtenido de <https://geniaglobal.com/buenas-practicas-y-sostenibilidad-en-solar-fotovoltaica/>

- Intelligence, M. (2024). *Mordor Intelligence*. Obtenido de https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/solar-photovoltaic-market?utm_source=chatgpt.com
- Inter-American Development Bank. (2016). *Inter-American Development Bank*. Obtenido de Solar Project Villanueva ME-L1257: <https://www.iadb.org/en/project/ME-L1257>
- INVESTIGACIÓN, E. (2021). Obtenido de Proyección de la Generación Distribuida en los sectores residencial, comercial e industrial en Chile: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/e2biz-2021_proyeccion_de_generacion_distribuida.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Iraragorri, E. L. (2022). *Gestión en la implementación de una instalación fotovoltaica en un centro escolar*. Obtenido de <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/59827/Eleder%20Loriaux%20-%20Trabajo%20de%20Fin%20de%20M%C3%A1ster%20Direcci%C3%B3n%20de%20Proyectos.pdf?sequence=1>
- IRENA. (s.f.). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://www.irena.org/Publications>
- IRENA. (2019). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_summary_2019_ES.pdf?la=en&hash=DE82F7DC53286F720D8E534A2142C2B8D510FB0B
- IRENA. (2021). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de Costos de generación de energía renovable en 2021: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Gen_Costs_2021_Summary_ES.pdf
- IRENA. (2023). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de Costes de generación de energía renovable en 2023: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023-ES>
- IRENA. (Mayo de 2023). *EnerNews*. Obtenido de Costos de capital de las renovables: <https://enernews.com/355097/irena-los-costos-de-capital-de-las-renovables>
- IRENA. (2024). *Agencia Internacional de Energías Renovables*. Obtenido de Estadísticas de energías renovables 2024: <https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024>
- IRENA. (Septiembre de 2024). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de International Renewable Energy Agency:

https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power-ES?utm_source=chatgpt.com

Lightsources. (01 de Agosto de 2024). *Cómo la energía solar a gran escala puede beneficiar a la transición energética*. Obtenido de https://lightsourcesbp.com/es/news/como-la-energia-solar-a-gran-escala-puede-beneficiar-a-la-transicion-energetica/?utm_source=chatgpt.com

LP, B. F. (s.f.). *BloombergNEF*. Obtenido de <https://about.bnef.com/>

Metal Frame Renewables. (s.f.). *Is agrovoltaics profitable? An economic and investment analysis*. Obtenido de https://www.mfrenovables.com/en_/es-rentable-la-agrovoltaica-un-analisis-economico-y-de-inversion/

Ministerio de Energías. (Marzo de 2018). *Bolivia*. Obtenido de Estudio de determinación de Costos de Operación,: https://energypedia.info/images/e/e2/Estudio_Costos_Fijos_OMA-Generacion_SOLAR_FV.pdf

MINT. (Octubre de 2018). *¿En qué consiste el sistema de seguimiento del sol?* Obtenido de <https://mintforpeople.com/noticias/en-que-consiste-sistema-seguimiento-sol/>

MITECO. (2022). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/guiaelaboracionesiaplantafotovoltaicassgea_tcm30-538300.pdf?utm_source=chatgpt.com

Montel Group. (s.f.). *What is Predictive Maintenance in Renewable Energy?* Obtenido de <https://montel.energy/resources/blog/what-is-predictive-maintenance-in-renewable-energy>

Next, G. (5 de Enero de 2024). *Greenvolt Next*. Obtenido de https://next.greenvolt.com/es/2024/01/05/4-retos-de-la-energia-solar-para-el-2024/?utm_source=chatgpt.com

Orkli, S.Coop. (2025). *Lean Construction: La metodología que optimiza la construcción y reduce residuos*. Obtenido de <https://www.orkli.com/es/web/confortysalud/-/lean-construction-la-metodologia-que-optimiza-la-construccion-y-reduce-residuos>

Pais, E. (2025). *CincoDías*. Obtenido de El gigante chino de paneles solares Longi prevé pérdidas de 1.167 millones de euros: https://cincodias.elpais.com/mercados-financieros/2025-01-17/el-pib-de-china-cumple-con-el-objetivo-oficial-al-crecer-un-5-en-2024.html?utm_source=chatgpt.com

- PR Newswire. (2025). *PR Newswire*. Obtenido de <https://www.prnewswire.com/in/news-releases/sunsure-energy-secures-inr-129-crore-in-long-term-debt-financing-from-tata-capital-and-aditya-birla-finance-for-its-solar-plant-in-augasi-uttar-pradesh-302387097.html#>
- PROMEXICO. (s.f.). *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en Mexico*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf
- PV Magazine. (2018). Obtenido de https://www.pv-magazine-latam.com/2018/10/02/financiacion-de-energias-renovables-en-la-ue-y-america-latina-tendencias-y-modelos-de-mercado/?utm_source=chatgpt.com: https://www.pv-magazine-latam.com/2018/10/02/financiacion-de-energias-renovables-en-la-ue-y-america-latina-tendencias-y-modelos-de-mercado/?utm_source=chatgpt.com
- PV Magazine. (2023). *Evolución comparada del LCOE eólica-solar*. Obtenido de Mercados y tecnología de energía solar: <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/08/30/segun-irena-en-2022-el-lcoe-de-los-proyectos-fotovoltaicos-a-gran-escala-disminuyo-un-3/>
- PV Magazine. (s.f.). *Leapting*. Obtenido de Robot de montaje de módulos: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2025/02/04/un-robot-de-montaje-que-instala-un-panel-fotovoltaico-por-minuto/>
- RCCI. (2022). *Propuesta de modelo predictivo inteligente para una planta fotovoltaica*. Obtenido de Revista Cubana de Ciencias Informáticas: <https://www.redalyc.org/journal/3783/378370413010/html/>
- RCCI. (s.f.). *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*. Obtenido de Propuesta de modelo predictivo inteligente para una planta fotovoltaica: <https://www.redalyc.org/journal/3783/378370413010/html/>
- Renew Economy. (2019). Obtenido de <https://reneweconomy.com.au/victorias-biggest-solar-farm-secures-finance-may-add-huge-battery-40941/>
- Revista Contacto. (s.f.). *Revista Contacto*. Obtenido de Robots para la limpieza de paneles solares: la nueva tecnología que llega a RD: <https://revistacontactord.com/robots-para-la-limpieza-de-paneles-solares-la-nueva-tecnologia-que-llega-a-rd/#:~:text=%C2%BFEn%20cu%C3%A1nto%20aumenta%20la%20eficiencia,en%20m%C3%A1s%20de%20un%2025%25.>
- RTE. (2023). *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica del Litoral: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/844/8444932007/html/>

- SolarPower Europe. (2025). *Operation & Maintenance: Best Practice Guidelines Version 6.0*. Obtenido de <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/operation-and-maintenance-best-practice-guidelines-version-6-0>
- SolarQuarter. (s.f.). *Managing Financial Risks In Solar PV Projects: The Role Of Hedging Strategies*. Obtenido de <https://solarquarter.com/2024/11/22/managing-financial-risks-in-solar-pv-projects-the-role-of-hedging-strategies/>
- T&DWorld. (s.f.). *7 Key Aspects to Consider When Planning and Implementing Large Energy Projects for the Future*. Obtenido de <https://www.tdworld.com/renewables/article/55281115/7-key-aspects-to-consider-when-planning-and-implementing-large-energy-projects-for-the-future>
- The Eco Experts. (2023). Obtenido de Guía completa de los huertos solares: https://www.theecoexperts.com/es/placas-solares/huerto-solar?utm_source=chatgpt.com
- Tibo Energy. (9 de abril de 2024). *Tibo Energy*. Obtenido de https://tibo.energy/es/blog/obstaculos-energias-renovables/?utm_source=chatgpt.com
- Timmons, D., Harris, J., & Roach, B. (s.f.). *Global Development And Environment Institute*. Obtenido de https://www.bu.edu/eci/files/2019/06/EconomiaEnergiasRenovables.pdf?utm_source=chatgpt.com
- U.S. Department of Energy. (s.f.). *INTRODUCTION TO COMMUNITY ENERGY STRATEGIC PLANNING*. Obtenido de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/cesp_guide_intro.pdf
- UGHW. (s.f.). *Urban Governance for Health and Well-being*. Obtenido de Evaluación de Impacto Social: <https://ughw.org/understanding-social-impact-assessments-why-they-matter-and-how-to-conduct-them-effectively/>
- Universidad de Los Andes. (s.f.). *Repositorio Tesis/Trabajos de Grado*. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/collections/4b81be47-603f-43d7-9af2-20eb2de677ca>
- Universidad EAFIT. (2024). *Modelo predictivo del riesgo de impago en servicios de conexión prestados por transportadores de energía colombianos para proyectos de generación solar*. Obtenido de <https://repository.eafit.edu.co/items/d650f82f-bfdb-4b35-b1a4-28b13aa5eb95>
- Víctor Baeschlin. (s.f.). *Transición Energética*. Obtenido de https://www.transicionenergetica.es/energias-renovables/canibalizacion-mercado-electrico/?utm_source=chatgpt.com
- Viindoo. (s.f.). *WACC (Weighted average cost of capital)*. Obtenido de <https://viindoo.com/blog/business-management-3/what-is-wacc-1383>

- World Bank Group. (2020). *Global Photovoltaic Power Potential by Country*. Obtenido de <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/466331592817725242/global-photovoltaic-power-potential-by-country>
- World Bank Group. (s.f.). *Global Solar Atlas*. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/map>
- XM. (2024). *Variables del Mercado de Energía*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/noticias/7131-comunicado-de-xm-sobre-las-variables-del-mercado-de-energia-en-agosto-de-2024#:~:text=Durante%20agosto%20de%202024%20el,fue%20de%20304.20%20COP/kWh>.
- Yepes, D. M. (2020). *TRÁMITES PARA PROYECTOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADOS A LA RED EN COLOMBIA*. Obtenido de Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.: chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcgclefindmkaj/https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15723/1/OchoaDaniel_2020_TramitesProyectosEnergia.pdf