

**Análisis de fallas que afectan la disponibilidad de energía de los sistemas solares en
Medellín**

Hernán Darío Chavarría Mora

Nixon Andrés Vargas Londoño

Asesor

Julieth Alexandra Baron Bayona

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Administrativas Económicas Contables y de Negocios ECACEN

Especialización en Gestión de Proyectos

2025

Dedicatoria

Dedicamos este proyecto con profundo agradecimiento a nuestras familias, quienes han sido nuestro pilar fundamental a lo largo de este proceso. Su constante apoyo, comprensión incondicional y motivación diaria nos impulsaron a superar cada reto con determinación y compromiso. A sus palabras de aliento en los momentos difíciles, a su paciencia frente a nuestras ausencias y a su fe inquebrantable en nuestras capacidades, les debemos la culminación de este trabajo. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra asesora, Julieth Alexandra Barón Bayona, por su valiosa orientación académica, su disposición permanente y sus acertadas recomendaciones que enriquecieron cada etapa del desarrollo de este proyecto de investigación. Su acompañamiento fue clave para consolidar el enfoque técnico y metodológico del trabajo.

Extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, por proporcionarnos las herramientas académicas, tecnológicas y humanas necesarias para nuestra formación profesional, y por fomentar un ambiente de aprendizaje autónomo, colaborativo y riguroso.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron con su tiempo, conocimientos y apoyo para que esta investigación se llevara a cabo con éxito.

Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como propósito analizar las fallas que afectan la disponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en Medellín, considerando las condiciones ambientales, técnicas y de mantenimiento que comprometen su eficiencia operativa. La energía solar representa hoy una alternativa sostenible frente a la creciente demanda energética urbana, pero su rendimiento se ve condicionado por diversos factores que requieren gestión adecuada. Medellín, con su clima tropical de montaña, caracterizado por alta humedad, lluvias frecuentes y nubosidad prolongada, plantea retos que pueden ocasionar pérdidas de generación por suciedad acumulada, sombreado parcial, fallas eléctricas o degradación de componentes.

A través de la revisión bibliográfica, análisis técnico y entrevistas a personal experto, se identificaron patrones de fallas comunes y se exploraron estrategias emergentes, como el mantenimiento predictivo basado en inteligencia artificial, sensores inteligentes, monitoreo en tiempo real y sistemas automatizados de limpieza. El proyecto se desarrolló mediante el estudio de dos sistemas solares ubicados en los centros comerciales Los Molinos y La Central, donde se recolectaron datos técnicos y de operación, además de realizar encuestas especializadas.

Los resultados evidencian que las principales fallas están asociadas a la acumulación de suciedad, deficiencias en el mantenimiento programado y efectos del entorno climático. Sin embargo, ambos sistemas cuentan con plataformas de monitoreo que permiten aplicar estrategias predictivas. Se concluye que el fortalecimiento del mantenimiento inteligente y el uso de tecnologías adaptadas al clima local mejoran la disponibilidad energética, extienden la vida útil de los equipos y consolidan la energía solar como una solución confiable y sostenible en contextos industriales y urbanos.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, disponibilidad energética, mantenimiento predictivo, fallas técnicas, eficiencia solar, Medellín, monitoreo inteligente.

Abstract

The purpose of this research project is to analyze the failures that affect the availability of solar photovoltaic systems installed in Medellín, considering the environmental, technical, and maintenance conditions that compromise their operational efficiency. Solar energy today represents a sustainable alternative to the growing urban energy demand, but its performance is conditioned by various factors that require proper management. Medellín, with its tropical mountain climate characterized by high humidity, frequent rainfall, and prolonged cloud cover, poses challenges that can cause generation losses due to accumulated dirt, partial shading, electrical failures, or component degradation.

Through a literature review, technical analysis, and interviews with expert personnel, common failure patterns were identified, and emerging strategies were explored, such as predictive maintenance based on artificial intelligence, smart sensors, real-time monitoring, and automated cleaning systems. The project was developed by studying two solar systems located in the Los Molinos and La Central shopping centers, where technical and operational data were collected, in addition to conducting specialized surveys.

The results show that the main failures are associated with dirt accumulation, deficiencies in scheduled maintenance, and the effects of the climate. However, both systems have monitoring platforms that allow for the application of predictive strategies. It is concluded that strengthening smart maintenance and the use of technologies adapted to the local climate improve energy availability, extend the lifespan of equipment, and consolidate solar energy as a reliable and sustainable solution in industrial and urban settings.

Keywords: photovoltaic systems, energy availability, predictive maintenance, technical failures, solar efficiency, Medellín, smart monitoring.

Tabla de contenido

Introducción	13
Justificación	16
Planteamiento del Problema	18
Árbol de Problemas.....	20
Análisis del Problema, sus Causas y Consecuencias	20
Objetivos	25
Objetivo General.....	25
Objetivos Específicos.....	25
Marco Teórico.....	26
Antecedentes de la Investigación.....	28
Bases Teóricas	31
Disponibilidad Energética en Sistemas Solares Fotovoltaicos	31
Componentes y Funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos	32
Fallas Comunes en Sistemas Fotovoltaicos	32
Estrategias de Mantenimiento Correctivo, Preventivo y Predictivo	33
Condiciones Climáticas y Contexto Urbano de Medellín.....	33
Resiliencia Energética y Mantenimiento Inteligente	34
Políticas Públicas y Normativas Técnicas	34
Estado del Arte.....	35
Marco Conceptual.....	39
Términos relacionados con el proyecto.	39
Marco Metodológico.....	41

Diseño metodológico	41
Variables e Hipótesis de la Investigación.	41
Variable independiente (VI): Tipos de fallas en sistemas solares fotovoltaicos	41
Variable dependiente (VD): Disponibilidad energética de los sistemas solares.....	42
Hipótesis de investigación	43
Población y muestra.....	43
Herramientas de análisis	44
Indicadores y fórmulas de evaluación.....	45
Cálculo de disponibilidad energética (%):.....	45
Frecuencia de fallas por tiempo:	45
Tasa de inactividad:	46
Rendimiento del sistema (Performance Ratio-PR):.....	46
Índice de severidad de fallas:	46
Formula de muestreo:	46
Datos de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Investigados.....	49
Datos meteorológicos Medellín 2025	49
Datos históricos de temperatura y precipitaciones de Medellín, para los meses de enero a agosto de 2025.....	49
Sistema solar centro comercial los Molinos	50
Datos de generación de energía en MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial los Molinos.....	52

Sistema solar centro comercial la Central.....	62
Datos de generación de energía en MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial la Central.....	64
Resultados Encuesta.....	74
Propuesta de Mejora de Acuerdo con el Análisis Realizado Durante la Investigación	93
Conclusiones.....	95
Referencias.....	97
Anexo 1.....	101

Listas de Tabla

Tabla 1 <i>Planteamiento del problema</i>	18
Tabla 2 <i>Definición conceptos claves del proyecto</i>	39
Tabla 3 <i>Matriz de Operacionalización</i>	42
Tabla 4 <i>Cronograma de actividades estimado</i>	47
Tabla 5 <i>Datos SSFV centro comercial los Molinos</i>	50
Tabla 6 <i>Relación en MWp, centro comercial los Molinos</i>	61
Tabla 7 <i>Datos SSFV centro comercial la Central</i>	62
Tabla 8 <i>Relación en MWp, centro comercial la Central.</i>	73

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	20
Figura 2 <i>Matriz energética de proyección de energías renovables en Colombia</i>	31
Figura 3 <i>Datos meteorológicos de Medellín para los meses de enero a agosto de 2025</i> .49	49
Figura 4 <i>Referencia del SSFV, centro comercial los Molinos.</i>	51
Figura 5 <i>Generación MWh enero 2025, centro comercial los Molinos.</i>	52
Figura 6 <i>Generación MWh febrero 2025, centro comercial los Molinos.</i>	53
Figura 7 <i>Generación MWh marzo 2025, centro comercial los Molinos.</i>	54
Figura 8 <i>Generación MWh abril 2025, centro comercial los Molinos.</i>	55
Figura 9 <i>Generación MWh mayo 2025, centro comercial los Molinos.</i>	56
Figura 10 <i>Generación MWh junio 2025, centro comercial los Molinos.</i>	57
Figura 11 <i>Generación MWh julio 2025, centro comercial los Molinos.</i>	58
Figura 12 <i>Generación MWh agosto 2025, centro comercial los Molinos.</i>	59
Figura 13 <i>Histórico de generación MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial los Molinos.</i>	60
Figura 14 <i>Referencia del SSFV, centro comercial la Central.</i>	63
Figura 15 <i>Generación MWh enero 2025, centro comercial la central.</i>	64
Figura 16 <i>Generación MWh febrero 2025, centro comercial la central.</i>	65
Figura 17 <i>Generación MWh marzo 2025, centro comercial la central.</i>	66
Figura 18 <i>Generación MWh abril 2025, centro comercial la central.</i>	67
Figura 19 <i>Generación MWh mayo 2025, centro comercial la central.</i>	68
Figura 20 <i>Generación MWh junio 2025, centro comercial la central.</i>	69
Figura 21 <i>Generación MWh julio 2025, centro comercial la central.</i>	70

Figura 22 <i>Generación MWh agosto 2025, centro comercial la central.</i>	71
Figura 23 <i>Histórico de generación MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial la Central.</i>	72
Figura 24 <i>Relación de técnicos vs profesionales que interviene los sistemas solares.</i> ..	74
Figura 25 <i>Años de experiencia del personal encuestado.</i>	76
Figura 26 <i>Centros atendidos por el personal técnico.</i>	77
Figura 27 <i>Fallas más frecuentes entendidas en los SSFV.</i>	78
Figura 28 <i>Frecuencia de fallos en los SSFV.</i>	80
Figura 29 <i>Factores climáticos que afectan a los SSFV.</i>	81
Figura 30 <i>Frecuencia de mantenimiento preventivos a los SSFV.</i>	82
Figura 31 <i>Se sigue un plan de mantenimiento para los SSFV.</i>	84
Figura 32 <i>Los SSFV, se encuentran monitoreados.</i>	85
Figura 33 <i>Estrategias en la reducción de fallas en los SSFV.</i>	86
Figura 34 <i>Operación de los SSFV.</i>	87
Figura 35 <i>Porcentaje de disponibilidad de los SSFV.</i>	88
Figura 36 <i>Recomendaciones personal experto encantado.</i>	90
Figura 37 <i>Los SSFV, se encuentran adaptados para el clima de Medellín.</i>	91

Introducción

En el marco del desarrollo sostenible y la búsqueda de soluciones energéticas limpias, la energía solar fotovoltaica ha emergido como una de las alternativas más prometedoras para enfrentar los retos del cambio climático y la creciente demanda energética en entornos urbanos. En Colombia, y particularmente en la ciudad de Medellín, se ha promovido activamente la implementación de sistemas solares como parte de una estrategia integral para reducir la dependencia de fuentes fósiles, minimizar la huella de carbono y fomentar una transición energética inclusiva y resiliente (Grupo Energía de Bogotá, 2020). No obstante, a pesar de su alto potencial, la eficiencia operativa y la disponibilidad continua de estos sistemas se ven frecuentemente comprometidas por múltiples factores técnicos, ambientales y de mantenimiento que afectan su rendimiento a corto y largo plazo.

En los últimos años, la ciudad de Medellín ha sido reconocida por su compromiso con la sostenibilidad urbana y la transición energética. Gracias a sus políticas públicas, incentivos institucionales y la creciente conciencia ambiental, se ha promovido la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en diversos sectores residenciales, educativos e industriales. Diversos estudios han demostrado el alto potencial de generación solar en entornos urbanos del Valle de Aburrá, evidenciando que la radiación disponible es suficiente para el funcionamiento eficiente de estos sistemas (UNAL, 2021).

La ciudad de Medellín, situada en una zona de clima tropical de montaña, presenta condiciones atmosféricas específicas que influyen significativamente en el comportamiento de los sistemas solares instalados. La alta nubosidad, las precipitaciones constantes, la humedad relativa elevada y las temperaturas variables pueden provocar fallas como el ensuciamiento de los paneles, sombreado parcial, corrosión de componentes eléctricos, disminución de la

eficiencia por sobrecalentamiento e interrupciones operativas por mala gestión del mantenimiento (Guaida, 2025). Además, se han identificado carencias en la planificación de instalaciones, en el uso de tecnologías adecuadas al contexto local y en los sistemas de monitoreo y diagnóstico temprano de fallas (Energía y Sostenibilidad, 2023).

(Javier Benavides et al., 2022) advierte que, en instituciones educativas de Medellín, "las condiciones ambientales particulares pueden alterar la eficiencia energética prevista si no se ajustan protocolos de mantenimiento y diseño adecuados" (p. 35). Además, investigaciones como las presentadas por (TERYS, 2024) destacan el uso de tecnologías inteligentes como el Internet de las Cosas (IoT), capaces de mejorar la supervisión y el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos en tiempo real, lo cual favorece la eficiencia operativa y reduce las interrupciones por fallas técnicas.

Frente a este panorama, el presente proyecto tiene como finalidad analizar de forma sistemática las fallas que afectan la disponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos en Medellín, identificando sus causas, consecuencias y posibles soluciones desde un enfoque técnico-científico. A través de una revisión exhaustiva de literatura especializada, estudios de caso en entornos urbanos similares y el uso de fuentes académicas de acceso libre, se pretende clasificar los tipos de fallas más comunes, evaluar su impacto en la eficiencia energética y proponer estrategias basadas en tecnologías emergentes como el mantenimiento predictivo, el monitoreo inteligente en tiempo real y el rediseño adaptativo de los sistemas (TERYS, 2024).

Investigaciones recientes desarrolladas en Colombia han dado origen a bases de datos abiertas para el análisis y la clasificación de fallas, permitiendo realizar diagnósticos más precisos y establecer medidas correctivas efectivas (Desenchufate.es, 2025). Estas iniciativas

refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque preventivo y adaptativo que responda a los desafíos ambientales locales mediante soluciones tecnológicas accesibles.

Esta investigación busca no solo contribuir al conocimiento académico en torno a la operación eficiente de sistemas solares, sino también generar insumos prácticos para instaladores, operadores, entidades públicas y privadas interesadas en mejorar la confiabilidad y sostenibilidad de sus proyectos fotovoltaicos. En última instancia, se espera que los resultados del estudio ayuden a consolidar a Medellín como una ciudad líder en la adopción y gestión de tecnologías de energía renovable adaptadas a su realidad climática, social y económica.

Así, este trabajo responde a una necesidad crítica en el marco de la transición energética nacional, alineándose con los lineamientos establecidos por el (Ministerio de Minas y Energía, 2023), que exigen soluciones tecnológicas territorialmente pertinentes para garantizar la sostenibilidad de la energía solar en Colombia.

Justificación

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en Medellín se ha convertido en una herramienta estratégica para avanzar hacia la sostenibilidad energética, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, la experiencia práctica ha demostrado que el rendimiento de estos sistemas no depende únicamente de su instalación, sino también de su adecuada operación, mantenimiento y adaptación a las condiciones ambientales locales. De acuerdo con Energía y Sostenibilidad (2023), “el monitoreo constante de los sistemas y la intervención temprana de fallas inciden directamente en la estabilidad energética a largo plazo” (párr. 2), lo cual resalta la importancia de la gestión proactiva de fallas técnicas.

Medellín presenta desafíos climáticos particulares como la alta nubosidad, lluvias persistentes y niveles elevados de humedad relativa, lo que contribuye al deterioro acelerado de componentes eléctricos y a la reducción de la eficiencia de los paneles solares por suciedad y sombreado parcial (Kennedy, 2023). Según (Guaida, 2025), las fallas más comunes en un sistema fotovoltaico “incluyen problemas de conexión, corrosión, puntos calientes y pérdida de rendimiento por acumulación de polvo” (párr. 3), situaciones que en muchos casos no son anticipadas por los operadores.

Además, el Grupo Energía de Bogotá (2020a) advierte que las soluciones tecnológicas tradicionales no siempre están diseñadas para responder a los cambios dinámicos del entorno climático colombiano. Esta falta de adaptación genera interrupciones operativas que disminuyen la confiabilidad del sistema. Por eso, la identificación y análisis de las fallas, junto con el diseño de estrategias de mitigación basadas en evidencia, se convierte en un imperativo técnico y económico.

Estudios realizados en Medellín muestran que, a pesar de la creciente adopción de energía solar, existe una limitada implementación de herramientas inteligentes de monitoreo y mantenimiento. Por ejemplo, Javier Benavides et al. (2022) explica que “en algunos casos las instalaciones no cuentan con estrategias técnicas postventa que aseguren la operación sostenida de los equipos” (p. 38), lo que conlleva pérdidas energéticas y financieras.

Así, este proyecto se justifica por la necesidad de generar conocimiento técnico que permita optimizar la disponibilidad de los sistemas solares en la ciudad. Se espera, además, proponer soluciones replicables en contextos similares mediante la integración de herramientas como el monitoreo en tiempo real (**IoT**) y el mantenimiento predictivo (TERYS, 2024). Finalmente, esta investigación aportará insumos útiles a entidades públicas, empresas de energía, instituciones educativas y comunidades que buscan fortalecer la sostenibilidad energética local, reducir el impacto ambiental y maximizar el aprovechamiento de las fuentes renovables.

En este contexto, el presente estudio se justifica por tres razones fundamentales:

Aborda un vacío técnico al enfocar el análisis en la disponibilidad operativa de los sistemas solares urbanos.

Integra herramientas modernas de diagnóstico y modelado, como el uso de datos climáticos históricos, bases de fallas (Desenchufate.es, 2025), y enfoques de inteligencia artificial aplicados al mantenimiento (Thakfan & Bin Salamah, 2024).

Propone recomendaciones prácticas aplicables a instalaciones reales, orientadas a mejorar el rendimiento, reducir el número de fallas y fortalecer la confianza en esta fuente renovable.

Finalmente, este trabajo se alinea con la Hoja de Ruta para una Transición Energética Justa 2025 del (Ministerio de Minas y Energía, 2023), que plantea como objetivo garantizar la

continuidad y calidad del suministro mediante soluciones sostenibles, adaptadas al territorio y resilientes al cambio climático. De esta forma, la investigación contribuye al fortalecimiento técnico-operativo de los sistemas solares y a la consolidación de Medellín como ciudad líder en innovación energética.

Planteamiento del Problema

Tabla 1

Planteamiento del problema

Pregunta	Descripción
¿Quién?	Empresas, instituciones educativas y residencias de Medellín que han instalado sistemas solares fotovoltaicos y dependen de su operación continua para suplir parte de su demanda energética. También incluye a los técnicos encargados del mantenimiento y monitoreo de dichos sistemas.
¿Dónde?	En la ciudad de Medellín, caracterizada por un clima tropical de montaña, alta nubosidad, humedad relativa elevada y lluvias frecuentes, lo que representa un entorno desafiante para los sistemas fotovoltaicos.
¿Qué?	Se presentan fallas técnicas, ambientales y de operación que afectan la disponibilidad y eficiencia de los sistemas solares. Estas incluyen acumulación de suciedad, corrosión, sombreado, desconexiones eléctricas, degradación de celdas y mala ejecución del mantenimiento.
¿Cuándo?	Estas fallas se presentan con mayor frecuencia durante condiciones climáticas adversas como lluvias intensas o períodos prolongados de nubosidad, aunque también pueden surgir por mantenimiento inadecuado en cualquier época del año.

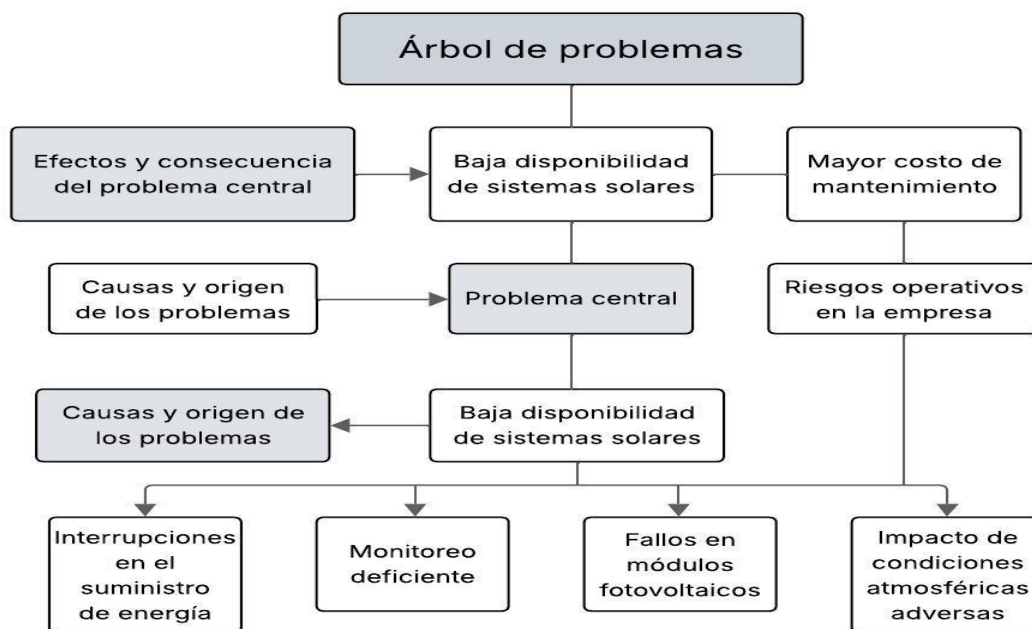
¿Por qué?	Porque muchos sistemas solares no están adaptados a las condiciones ambientales locales y carecen de monitoreo en tiempo real o mantenimiento predictivo. Esto lleva a interrupciones frecuentes, baja eficiencia y disminución del retorno de inversión. Además, no existe una sistematización clara de las fallas recurrentes ni estrategias estandarizadas para su mitigación.
Pregunta de investigación	¿Qué tipos de fallas afectan con mayor frecuencia la disponibilidad de los sistemas solares instalados en Medellín y qué estrategias técnicas pueden implementarse para prevenirlas o mitigarlas eficazmente bajo las condiciones climáticas locales?

Nota: La tabla presentada organiza de forma concisa los elementos esenciales del planteamiento del problema, facilitando la identificación clara de los actores implicados, el contexto, la naturaleza del problema, los momentos en que ocurre y sus causas principales. Esta estructura permite delimitar con precisión el enfoque de la investigación y sustentar la formulación de la pregunta orientadora del estudio. *Fuente.* Elaboración de los autores.

Árbol de Problemas

Figura 1

Árbol de problemas



Fuente. Elaboración de los autores.

Análisis del Problema, sus Causas y Consecuencias

Problema central: La baja disponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en Medellín representa un obstáculo significativo para la consolidación de una matriz energética sostenible. A pesar del crecimiento de estas tecnologías en la región, los sistemas presentan fallas operativas frecuentes que reducen su eficiencia y confiabilidad. Según Energía y Sostenibilidad (2023), “el monitoreo constante de los sistemas y la intervención temprana de fallas inciden directamente en la estabilidad energética a largo plazo” (párr. 2). Esto indica que la falta de seguimiento técnico adecuado es uno de los factores clave del problema.

Causas del problema: El origen de esta problemática se puede clasificar en causas técnicas y causas ambientales, íntimamente ligadas al contexto geográfico y climático de Medellín.

Causas Técnicas:

Mantenimiento deficiente: Muchas instalaciones no cuentan con planes preventivos o predictivos, lo cual permite que fallas menores escalen a fallas críticas (Desenchufate.es, 2025).

Fallas en componentes: Las conexiones sueltas, la corrosión de terminales, el deterioro de inversores o módulos son comunes en instalaciones con materiales de baja calidad o poca protección (Guaida, 2025).

Ausencia de monitoreo en tiempo real: La carencia de tecnologías IoT que permitan supervisar el rendimiento de forma continua impide detectar anomalías de manera oportuna (TERYS, 2024).

Causas Ambientales: Condiciones climáticas adversas: Medellín se caracteriza por una alta nubosidad, humedad relativa elevada y lluvias frecuentes, que impactan directamente el rendimiento de los módulos fotovoltaicos (Kennedy, 2023)

Ensuciamiento por lluvias o contaminación: La acumulación de polvo y humedad en los paneles reduce la eficiencia si no se cuenta con sistemas de limpieza automatizados o protocolos regulares (Di et al., 2023).

Consecuencia del Problema: El problema central genera una serie de consecuencias de tipo técnico, económico y social, que afectan tanto la operación de los sistemas como su viabilidad a largo plazo.

Eficiencia energética reducida: Los sistemas no logran operar al 100 % de su capacidad por periodos prolongados, lo cual disminuye la energía generada frente a lo esperado. Esto afecta la autosuficiencia de usuarios residenciales, comerciales e institucionales.

Aumento en costos de mantenimiento: La falta de diagnóstico temprano genera intervenciones correctivas más costosas y frecuentes. Según PV Kahana (2025), la ausencia de detección predictiva “incrementa hasta en un 35 % el gasto en reparaciones correctivas anuales” (párr. 4).

Desconfianza tecnológica y de pérdida de sostenibilidad: Cuando los sistemas presentan fallos recurrentes, los usuarios perciben que la energía solar no es confiable ni rentable. Esto compromete su adopción en nuevas instalaciones y afecta los objetivos de transición energética (Grupo Energía de Bogotá, 2020a).

¿Porque se va a Hacer?

Porque los sistemas solares instalados en Medellín no están alcanzando niveles óptimos de disponibilidad energética debido a fallas técnicas, condiciones ambientales adversas y deficiencias en su mantenimiento. Estas fallas disminuyen el rendimiento esperado, incrementan los costos de operación y afectan negativamente la percepción pública sobre la viabilidad de la energía solar en entornos urbanos. Como afirman Energía y Sostenibilidad (2023), la ausencia de monitoreo y mantenimiento adecuado impacta directamente la estabilidad energética. Es fundamental investigar esta problemática para evitar que se generalicen errores de instalación y gestión que comprometan la sostenibilidad del sistema.

¿Para qué se va a Hacer?

Para identificar, clasificar y analizar las fallas más frecuentes que afectan la operatividad de los sistemas fotovoltaicos en Medellín, con el fin de proponer estrategias de mitigación

basadas en evidencia técnica. El objetivo final es mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad de estos sistemas, contribuyendo así a la consolidación de la transición energética en la ciudad. Además, este estudio busca ofrecer recomendaciones prácticas a operadores, instaladores y responsables de políticas energéticas locales, fundamentadas en datos reales y experiencias contextualizadas.

¿Qué Problemas Resuelve?

El proyecto resuelve la falta de disponibilidad operativa en sistemas solares urbanos, causada por:

Ausencia de tecnologías de monitoreo inteligente.

Mantenimiento reactivo en lugar de predictivo.

Inadecuada adaptación al clima local (alta nubosidad, humedad, lluvia).

Equipos mal seleccionados o con especificaciones técnicas insuficientes.

Al resolver esta problemática, se contribuye a reducir las pérdidas de generación, los costos de reparación, y se fortalece la confianza del usuario final en las tecnologías solares.

¿Cómo se va a Hacer?

Mediante una metodología de investigación mixta, que incluirá:

Revisión bibliográfica de estudios técnicos y científicos relacionados con fallas fotovoltaicas, mantenimiento y eficiencia energética.

Análisis de datos secundarios de rendimiento de sistemas solares operativos en Medellín.

Entrevistas a expertos del sector energético y técnico (instaladores, operadores, ingenieros).

Identificación y clasificación de fallas por tipo (ambientales, técnicas, operativas).

Propuesta de estrategias de solución, incluyendo monitoreo con IoT, mantenimiento predictivo y rediseño técnico adaptado al clima local.

Validación de las soluciones mediante contraste con experiencias reales y mejores prácticas documentadas.

Objetivos

Objetivo General

Analizar las fallas técnicas, ambientales y operativas que afectan la disponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en la ciudad de Medellín, con el fin de proponer estrategias de mejora que optimicen su eficiencia y continuidad operativa en condiciones climáticas locales.

Objetivos Específicos

Diagnosticar las principales fallas que afectan los sistemas solares fotovoltaicos en Medellín, clasificándolas según su origen: técnico, ambiental o de operación.

Cuantificar el impacto de las fallas identificadas sobre la disponibilidad energética, mediante el análisis de indicadores de rendimiento, eficiencia y frecuencia de fallos.

Diseñar propuestas de mejora que incluyan estrategias de mantenimiento predictivo IoT, e integración de componentes adaptados al clima local.

Marco Teórico

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado en la última década como una alternativa viable y sostenible para la generación eléctrica en contextos urbanos. Este tipo de energía, derivada de la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante celdas solares, representa una solución clave frente a los desafíos del cambio climático, el agotamiento de combustibles fósiles y la necesidad de transición energética en ciudades intermedias como Medellín. En particular, Medellín presenta un contexto prometedor para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos gracias a sus niveles de radiación solar, el apoyo institucional a tecnologías limpias y la creciente conciencia ciudadana sobre sostenibilidad (Grupo Energía de Bogotá, 2020a)

Según investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, el Valle de Aburrá posee un potencial significativo de generación solar en entornos urbanos. Correa Sánchez (2020) confirma que diversos estudios han señalado que el entorno urbano de Medellín presenta características adecuadas para la implementación de sistemas fotovoltaicos distribuidos, gracias a su infraestructura y condiciones físicas favorables, lo cual ha sido validado mediante mediciones de irradiancia y análisis de viabilidad técnica. UNAL (2021) destaca que Medellín, a pesar de ser una ciudad con alta nubosidad, posee una irradiación solar suficiente para permitir instalaciones rentables de pequeña y mediana escala, especialmente si se optimizan factores como la inclinación, orientación y limpieza de los módulos.

Sin embargo, uno de los principales desafíos de la implementación de estos sistemas en Medellín no es su instalación inicial, sino la garantía de su disponibilidad operativa. En este contexto, el término “disponibilidad energética” hace referencia al tiempo real y efectivo en el cual un sistema fotovoltaico se encuentra produciendo energía según su capacidad instalada. Esta

disponibilidad se ve afectada por fallas técnicas, operacionales y ambientales que comprometen su continuidad, eficiencia y sostenibilidad (Energía y Sostenibilidad, 2023). La importancia de garantizar dicha disponibilidad radica no solo en la generación estable de electricidad, sino también en la valorización económica y social de las tecnologías solares en zonas urbanas.

Entre los principales factores que afectan la disponibilidad se encuentran: las fallas en los componentes eléctricos (inversores, conexiones, fusibles), el deterioro de los módulos por condiciones climáticas (humedad, lluvia ácida, radiación excesiva), la acumulación de polvo y suciedad en la superficie de los paneles, y los errores de instalación o dimensionamiento. Estas fallas pueden ser el resultado tanto de condiciones externas como de una deficiente estrategia de mantenimiento. Tal como lo menciona Kahana (2025), la eficiencia de los sistemas solares urbanos puede disminuir hasta un 25 % si no se implementan protocolos de mantenimiento regular y limpieza especializada.

La literatura técnica ha clasificado las fallas en tres grandes grupos: fallas técnicas, fallas operacionales y fallas ambientales. Las fallas técnicas se relacionan con defectos en los componentes del sistema, como módulos con celdas agrietadas, inversores con mal funcionamiento, conexiones sueltas o sobrecalentamientos. Las fallas operacionales incluyen errores de configuración, mal dimensionamiento, deficiencias en la instalación o uso inadecuado por parte de los usuarios. Por su parte, las fallas ambientales están directamente relacionadas con el entorno físico donde se encuentra el sistema, como la presencia de sombra, acumulación de polvo, altas temperaturas o humedad constante, factores típicos del clima de Medellín (Guaida, 2025; Lufin & Andree, 2023).

El mantenimiento predictivo y el monitoreo inteligente han sido propuestos como herramientas clave para prevenir la pérdida de disponibilidad. Según TERYS (2024), los

sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) permiten detectar fallas en tiempo real, enviar alertas a operadores y ajustar el comportamiento del sistema para evitar interrupciones. Además, estudios recientes han demostrado que el uso de algoritmos de análisis predictivo puede anticipar con alta precisión la degradación de los módulos, permitiendo intervenciones programadas y menos costosas (Desenchufate.es, 2025).

Javier Benavides et al. (2022) plantea que, en instituciones educativas de Medellín donde se han implementado sistemas fotovoltaicos, uno de los principales problemas ha sido la falta de seguimiento técnico luego de la instalación. Esto ha derivado en fallas no detectadas, pérdida de producción energética y costos inesperados de mantenimiento. La autora concluye que “la eficiencia energética prevista se ve alterada si no se ajustan protocolos de mantenimiento y diseño adecuados” (p. 35), lo cual evidencia la necesidad de integrar herramientas de supervisión automatizada desde el diseño mismo del proyecto.

A nivel técnico, también es necesario considerar que muchas de las fallas recurrentes en sistemas solares en Medellín se deben a la importación de componentes no adaptados al clima local. Tal como lo explica el Grupo Energía de Bogotá(2020a), Muchos de los equipos solares utilizados en zonas urbanas del país no han sido diseñados con certificaciones que garanticen su durabilidad frente a condiciones ambientales exigentes como la humedad, el polvo o las altas temperaturas. Esto genera una disminución en su vida útil y eleva los costos por reemplazo prematuro de partes críticas.

Antecedentes de la Investigación.

La energía solar fotovoltaica ha ganado protagonismo como eje estratégico de la transición energética en Colombia, no solo por su carácter renovable, sino también por su potencial de democratización del acceso a la energía. En esta línea, el Ministerio de Minas y

Energía (2023), en su Hoja de ruta para una Transición Energética Justa, establece que uno de los pilares del proceso es “garantizar la disponibilidad, continuidad y calidad del suministro a través de soluciones sostenibles adaptadas a las condiciones territoriales y climáticas” (p. 19). Este enfoque impulsa iniciativas de generación distribuida como la energía solar urbana, especialmente en zonas densamente pobladas como Medellín.

Medellín, reconocida como una ciudad pionera en innovación energética, ha impulsado la instalación de sistemas fotovoltaicos en viviendas, instituciones públicas y edificaciones comerciales. Sin embargo, la disponibilidad de estos sistemas, entendida como su capacidad de operar sin interrupciones y producir energía conforme a su diseño, ha enfrentado serios desafíos debido a condiciones ambientales, fallas técnicas y carencias en monitoreo y mantenimiento. Según Correa Sánchez (2020), a pesar del alto potencial solar en entornos urbanos del Valle de Aburrá, dicho potencial “se ve limitado cuando no se tienen en cuenta factores como el ensuciamiento de paneles, el sombreado parcial y el deterioro por humedad” (párr. 4).

En otro informe, la UNAL (2021), resalta que Medellín posee un contexto favorable para sistemas solares a pequeña escala, pero advierte que su eficiencia depende de la correcta planificación, operación y mantenimiento, variables que actualmente presentan deficiencias en muchas instalaciones. Esto coincide con estudios como el de Javier Benavides et al. (2022), quien evidenció que las fallas recurrentes en instalaciones solares escolares en Medellín se relacionaban con “la falta de estrategias luego de la instalación y la ausencia de seguimiento técnico regular” (p. 35).

Además, el Grupo Energía de Bogotá (2020a), advierte que muchos equipos solares importados no están diseñados para resistir condiciones de alta humedad y temperatura, lo que genera fallas prematuras. Esta problemática técnica se agrava por la limitada incorporación de

tecnologías inteligentes de supervisión. TERYS (2024), documenta que el monitoreo con **sensores IoT** permite anticipar fallos y minimizar el tiempo de inactividad, pero su adopción en Medellín sigue siendo baja.

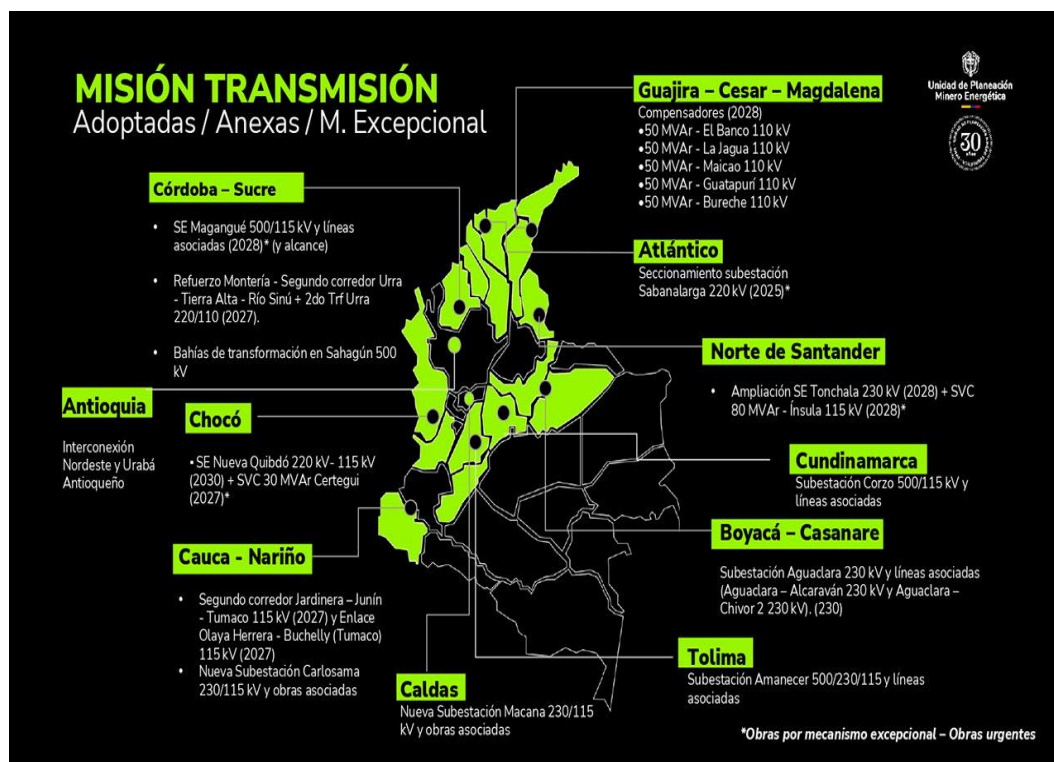
En paralelo, estudios como los de Kahana (2025) y Desenchufate.es (2025) han promovido la creación de bases de datos abiertas para monitorear fallos en módulos solares, contribuyendo al análisis predictivo y al diseño de planes de mantenimiento más eficientes. Estas herramientas, aunque utilizadas en otras regiones, aún no se aplican de forma sistemática en Medellín.

Lufin & Andree (2023) también ha demostrado que el ensuciamiento de los paneles solares en entornos urbanos puede reducir su rendimiento hasta en un 30 %, si no se implementan limpiezas periódicas o sistemas de autolimpieza. Esto es especialmente relevante para Medellín, ciudad que presenta altos niveles de precipitación, nubosidad prolongada y contaminación ambiental urbana.

A nivel institucional, el documento de la transición energética justa (Ministerio de Minas y Energía, 2023), subraya la necesidad de fortalecer el monitoreo, operación y mantenimiento de las tecnologías renovables para asegurar su sostenibilidad. Específicamente, se promueve la capacitación de talento humano, el diseño de soluciones adaptadas al territorio y el seguimiento a las condiciones técnicas de operación.

Figura 2

Matriz energética de proyección de energías renovables en Colombia



Fuente. (Presidencia de la República de Colombia, 2025)

Bases Teóricas

Las bases teóricas de esta investigación se estructuran en torno a cinco conceptos fundamentales que permiten comprender, analizar y proponer soluciones al problema de la baja disponibilidad en sistemas solares fotovoltaicos. Estos ejes abarcan la disponibilidad energética, el comportamiento técnico de los sistemas fotovoltaicos, las causas comunes de fallas, las estrategias de mantenimiento, y el papel del contexto climático urbano en la eficiencia solar.

Disponibilidad Energética en Sistemas Solares Fotovoltaicos

La disponibilidad energética se refiere al tiempo real en el que un sistema fotovoltaico se encuentra operativo y generando energía conforme a su diseño. Es un indicador clave de desempeño, que se ve afectado por fallas técnicas, ambientales y operativas. Energía y

Sostenibilidad (2023) destaca que “el monitoreo constante de los sistemas y la intervención temprana de fallas inciden directamente en la estabilidad energética a largo plazo” (párr. 2).

Cuando un sistema presenta baja disponibilidad, no solo disminuye la producción eléctrica, sino que también se compromete la sostenibilidad técnica y económica del proyecto.

Componentes y Funcionamiento de los Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas solares están compuestos por módulos fotovoltaicos, inversores, estructuras de soporte, cableado y protecciones. Su rendimiento depende tanto del diseño inicial como del mantenimiento posterior. De acuerdo con TERYS (2024), “las fallas eléctricas en sistemas solares suelen presentarse en los inversores, las conexiones y los módulos, y son prevenibles mediante monitoreo inteligente y mantenimiento oportuno” (p. 6). Estos componentes pueden verse afectados por factores internos (como defectos de fábrica o errores de instalación) y externos (clima, suciedad, sobrecalentamiento, entre otros).

Fallas Comunes en Sistemas Fotovoltaicos

Las fallas en sistemas solares se clasifican generalmente como:

Fallas técnicas: Defectos en módulos, fusibles, cableado o inversores.

Fallas operativas: Problemas de configuración, errores humanos o diseño deficiente.

Fallas ambientales: Sombreado, polvo, humedad, alta temperatura o lluvias.

Grupo Energía de Bogotá (2020), entre las fallas más comunes se encuentran “la corrosión de terminales, puntos calientes, conexiones flojas y pérdida de rendimiento por suciedad acumulada” (párr. 3). Además, la Lufin & Andree (2023) advierte que el ensuciamiento puede reducir la eficiencia del sistema hasta en un 30 % si no se realizan limpiezas periódicas, especialmente en ciudades con alta humedad como Medellín.

Estrategias de Mantenimiento Correctivo, Preventivo y Predictivo

Existen tres enfoques principales para el mantenimiento de sistemas solares:

Correctivo: Intervenciones después de la falla. Es costoso y reactivo.

Preventivo: Rutinas programadas para reducir riesgos.

Predictivo: Uso de tecnologías para anticipar fallas antes de que ocurran.

TERYS (2024) indica que el mantenimiento predictivo basado en sensores y sistemas de monitoreo IoT “ha demostrado reducir los tiempos de inactividad y prolongar la vida útil de los sistemas en más del 20 %” (p. 8). A pesar de su efectividad, este enfoque aún es poco implementado en sistemas de pequeña escala en Medellín.

Condiciones Climáticas y Contexto Urbano de Medellín

El entorno climático urbano influye significativamente en el comportamiento de los sistemas solares. Medellín, con un clima tropical de montaña, presenta alta nubosidad, humedad persistente y lluvias frecuentes, lo que incrementa el riesgo de fallas por oxidación, sombreado o suciedad.

Correa Sánchez (2020) señala que “aunque Medellín cuenta con un gran potencial fotovoltaico, la eficiencia real puede verse afectada por condiciones locales como la radiación solar intermitente, la inclinación de los techos y la contaminación ambiental” (párr. 4). Esta realidad exige que las soluciones técnicas sean adaptadas al territorio, tal como lo propone la Hoja de ruta para una Transición Energética Justa 2025, en la que el Ministerio de Minas y Energía (2023) destaca la importancia de soluciones sostenibles, resilientes y pertinentes al contexto regional.

Resiliencia Energética y Mantenimiento Inteligente

La resiliencia energética se entiende como la capacidad del sistema para mantener su funcionamiento frente a fallas técnicas, climáticas o condiciones adversas. En sistemas solares urbanos, esta resiliencia puede reforzarse mediante mantenimiento predictivo e inteligencia operativa. (Desenchufate.es, 2025) y (TERYS, 2024) destacan que la implementación de monitoreo inteligente, sensores IoT, y plataformas de análisis de datos permite anticipar fallas, mejorar la operatividad y reducir el tiempo de inactividad. La resiliencia energética, por tanto, no es solo una capacidad técnica, sino una estrategia de sostenibilidad urbana, especialmente en ciudades como Medellín.

Políticas Públicas y Normativas Técnicas

El marco normativo colombiano apoya la expansión de tecnologías limpias mediante regulaciones y políticas diseñadas para fomentar su adopción y asegurar su operación segura. La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) promueve el registro y certificación de proyectos solares, facilitando beneficios tributarios y regulaciones de conexión. Además, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), mediante resoluciones como la CREG 148 de 2021, establece requisitos técnicos para la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red de distribución (CREG, 2021). Estas normativas son clave para el correcto diseño, mantenimiento y operación de los sistemas. El (Ministerio de Minas y Energía, 2023), en su Hoja de Ruta para una Transición Energética Justa, resalta la necesidad de soluciones adaptadas al territorio que incluyan monitoreo técnico y fortalecimiento del talento humano para la operación de tecnologías renovables. Esto sustenta el llamado a implementar estrategias de mantenimiento inteligente y resiliente, contextualizadas a entornos urbanos como Medellín.

Estado del Arte

En la última década, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las principales soluciones para diversificar las matrices energéticas, reducir las emisiones contaminantes y promover el desarrollo sostenible en los entornos urbanos. En Medellín, ciudad reconocida por su liderazgo en innovación energética, el crecimiento en la adopción de tecnologías fotovoltaicas ha sido significativo, no solo en el ámbito residencial, sino también en sectores comerciales e institucionales. Sin embargo, uno de los desafíos críticos es garantizar su disponibilidad energética, es decir, su operación continua con altos niveles de eficiencia, en condiciones ambientales adversas.

Diversos estudios han confirmado que Medellín cuenta con condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía solar, a pesar de sus particulares características climáticas. Investigaciones lideradas por la Universidad Nacional de Colombia (UNAL, 2021), han establecido que el Valle de Aburrá presenta un potencial destacado de irradiación solar, con un promedio diario de 4,5 kWh/m², lo cual permite el funcionamiento eficiente de sistemas fotovoltaicos distribuidos. Sin embargo, la alta nubosidad, la humedad y las lluvias frecuentes presentan retos significativos para la operación ininterrumpida de estos sistemas.

Correa Sánchez (2020), señala que, si bien la infraestructura urbana de Medellín permite la implementación de sistemas fotovoltaicos, el clima tropical de montaña con niveles elevados de precipitación y humedad constante presenta un desafío estructural y operativo. En efecto, la variabilidad climática genera condiciones como el ensuciamiento de los paneles, el sombreado parcial y la corrosión de componentes eléctricos, lo cual afecta la eficiencia energética de las instalaciones, especialmente cuando no se aplican medidas de mantenimiento sistemáticas.

De acuerdo con Energía y Sostenibilidad (2023), uno de los principales factores que compromete la continuidad operativa de los sistemas solares en entornos urbanos es la falta de estrategias de mantenimiento adecuadas. Las fallas más comunes en estos sistemas suelen clasificarse en tres grandes grupos: técnicas, operativas y ambientales. Las técnicas incluyen el mal funcionamiento de inversores, cables deteriorados o módulos defectuosos. Las fallas operativas surgen de errores en la instalación, dimensionamiento inadecuado o falta de monitoreo técnico. Las fallas ambientales se relacionan con la acumulación de polvo, humedad, temperatura elevada o lluvia ácida.

La evidencia recopilada por Desenchufate.es (2025), mediante la creación de una base de datos abierta de fallas en paneles solares en Medellín, ha permitido categorizar con mayor claridad los eventos recurrentes que afectan estos sistemas. Esta base de datos, desarrollada con apoyo de instituciones como el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), ofrece un insumo valioso para establecer relaciones entre los factores de falla y proponer estrategias de monitoreo predictivo. Asimismo, Lufin & Andree (2023), resaltan que el ensuciamiento puede llegar a reducir el rendimiento de los sistemas solares hasta en un 30 %, si no se realiza limpieza periódica.

En lo referente al mantenimiento, la literatura especializada ha documentado la evolución desde esquemas correctivos tradicionales hacia modelos preventivos y predictivos. TERYS (2024), resalta que el uso de sensores IoT, sistemas de monitoreo remoto y plataformas inteligentes de gestión energética permiten detectar anomalías operativas con antelación, lo que reduce tiempos de inactividad y mejora la eficiencia global del sistema. Esta tendencia cobra especial importancia en el contexto urbano de Medellín, donde las condiciones atmosféricas pueden cambiar drásticamente en periodos cortos.

Experiencias aplicadas en Medellín también confirman estas problemáticas. En su estudio de caso, Javier Benavides et al. (2022) evidenciaron que la falta de seguimiento técnico posterior a la instalación de sistemas solares en instituciones educativas llevó a caídas significativas en la producción energética. Los autores concluyen que, sin una estrategia robusta de operación y mantenimiento, los beneficios de la tecnología solar pueden verse comprometidos.

La gestión técnica de los sistemas solares en la ciudad también se ha visto limitada por el uso de componentes no adaptados al clima local. El Grupo Energía de Bogotá (2020a) advierte que muchos de los equipos fotovoltaicos utilizados en Colombia no cuentan con certificaciones de resistencia a condiciones de alta humedad, lo que genera deterioro prematuro. Además, se ha identificado una baja adopción de tecnologías de autolimpieza y una escasa estandarización de protocolos técnicos, lo que contribuye a fallas frecuentes.

En términos de regulación, el Ministerio de Minas y Energía (2023) establece en la Hoja de Ruta para una Transición Energética Justa que es fundamental mejorar la operación, mantenimiento y seguimiento de los sistemas de generación renovable. Este documento oficial subraya la necesidad de adaptar las soluciones tecnológicas a los territorios, promover el monitoreo inteligente, formar talento humano especializado y fomentar la sostenibilidad en la operación de los sistemas. Estas directrices se alinean con las necesidades identificadas en Medellín, donde aún existe una brecha entre el potencial fotovoltaico y la eficiencia real de las instalaciones.

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG, 2021) ha señalado la importancia de garantizar la confiabilidad de la operación técnica de las fuentes no convencionales de energía renovable, lo cual incluye asegurar una continuidad operativa adecuada y una respuesta oportuna a las fallas que puedan surgir en el sistema. Sin embargo, todavía se requiere una

implementación más activa de estas recomendaciones a nivel local, especialmente en instalaciones pequeñas y medianas que no cuentan con planes técnicos estructurados.

Desde el punto de vista del contexto comercial, en Medellín existen ejemplos significativos de adopción solar con fines empresariales. En el caso de los centros comerciales Los Molinos y La Central, se han documentado eventos recurrentes de desconexión, bajo rendimiento en días lluviosos y deficiencias en la supervisión del sistema. Esta evidencia práctica refuerza la necesidad de contar con estudios que integren variables técnicas, climáticas y de gestión para proponer estrategias viables que respondan a los desafíos reales de operación.

Por último, la necesidad de avanzar hacia la resiliencia energética ha sido destacada en múltiples investigaciones. Este concepto se refiere a la capacidad de los sistemas energéticos para mantener su operación y recuperación ante perturbaciones externas, como condiciones climáticas extremas o fallas técnicas inesperadas. Según Energía y Sostenibilidad (2023), la resiliencia energética en entornos urbanos puede fortalecerse mediante la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo e infraestructura técnica adaptada.

Marco Conceptual

Términos relacionados con el proyecto.

Tabla 2

Definición conceptos claves del proyecto

Término	Definición
Sistemas	Sistemas que convierten directamente la radiación solar en energía eléctrica
Fotovoltaicos (FV)	mediante el uso de módulos solares (Javier Benavides et al., 2022)
Disponibilidad Energética	Es el porcentaje de tiempo durante el cual un sistema fotovoltaico se encuentra operativo y produciendo energía de acuerdo con su capacidad instalada (Energía y Sostenibilidad, 2023).
Fallas Técnicas	Son aquellas relacionadas con el mal funcionamiento de componentes como inversores, módulos solares, fusibles y cableado (Grupo Energía de Bogotá, 2020).
Fallas Ambientales	Se refieren a la disminución en la eficiencia o interrupción del sistema debido a factores climáticos como humedad, lluvia, alta nubosidad o polvo acumulado (Lufin & Andree, 2023).
Fallas Operativas	Involucran errores humanos, fallos en la configuración del sistema o ausencia de mantenimiento periódico adecuado (Javier Benavides et al., 2022).
Mantenimiento Predictivo	Estrategia de mantenimiento basada en el análisis anticipado de datos para prevenir fallas antes de que ocurran, optimizando recursos y disponibilidad (TERYS, 2024).
Monitoreo Inteligente	Uso de tecnologías como sensores, IoT y plataformas digitales que permiten visualizar y registrar en tiempo real el comportamiento del sistema fotovoltaico (Desenchufate.es, 2025).

Sensores Ambientales	Dispositivos que miden variables como irradiancia, temperatura y humedad para evaluar el entorno operativo del sistema (TERYS, 2024)
Condiciones Climáticas Locales	Hace referencia al clima tropical de montaña de Medellín, caracterizado por alta humedad, nubosidad y lluvias frecuentes, que afectan el rendimiento de los sistemas FV (Correa Sánchez, 2020).
Resiliencia Energética	Capacidad de un sistema solar para mantener o recuperar su funcionalidad ante condiciones ambientales adversas o fallas técnicas, adaptándose al entorno (Ministerio de Minas y Energía, 2023).
Plataformas de Monitoreo	Software especializado utilizado para la gestión de datos técnicos de los sistemas solares, detectando alertas de fallo y proporcionando estadísticas operativas (TERYS, 2024).
Disponibilidad Operativa	Grado en el que un sistema solar está activo produciendo energía sin interrupciones por fallas, mantenimiento u otros eventos (Energía y Sostenibilidad, 2023).

Nota: Se presentan los conceptos clave que fundamentan el desarrollo del proyecto de investigación 'Análisis de fallas que afectan la disponibilidad de los sistemas solares instalados en la ciudad de Medellín'. Cada término ha sido seleccionado con base en su relevancia para los procesos técnicos, operativos y ambientales que inciden en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos. Las definiciones están respaldadas por las fuentes bibliográficas utilizadas en el proyecto. *Fuente.* Elaboración de los autores.

Marco Metodológico

Diseño metodológico

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo-cualitativo con diseño descriptivo y explicativo. Es descriptivo en tanto busca identificar y categorizar los tipos de fallas que afectan los sistemas solares fotovoltaicos en Medellín; y explicativo porque pretende analizar cómo estas fallas inciden en la disponibilidad energética de dichos sistemas. El estudio también tiene un carácter aplicado, orientado a proponer estrategias que mejoren la operación y el mantenimiento de estas tecnologías en el contexto urbano local.

Variables e Hipótesis de la Investigación.

Variable independiente (VI): Tipos de fallas en sistemas solares fotovoltaicos

Definición conceptual. Conjunto de condiciones, eventos o defectos técnicos, ambientales y operativos que afectan el funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico.

Definición operacional. Se medirá mediante la frecuencia, severidad y tipo de falla reportada en sistemas solares instalados en Medellín, incluyendo:

Fallas técnicas (inversores, módulos, conexiones).

Fallas ambientales (lluvia, humedad, sombreado).

Fallas operativas (errores humanos, mantenimiento deficiente).

Variable dependiente (VD): Disponibilidad energética de los sistemas solares

Definición conceptual. Proporción de tiempo que un sistema solar permanece en operación produciendo energía conforme a su capacidad instalada.

Definición operacional. Se medirá en porcentaje (%) sobre el tiempo total previsto de operación, tomando en cuenta tiempos de inactividad por fallas o mantenimientos no programados.

Tabla 3

Matriz de Operacionalización

Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas de recolección
Tipo de fallas (VI)	Técnica, ambiental, operativa	Frecuencia, severidad, tipo de componente afectado	Encuestas, entrevistas, revisión técnica
Disponibilidad (VD)	Tiempo de operación efectiva	Horas activas vs esperadas, % de producción real.	Registros de sistemas, sensores IoT, reportes

Nota: La tabla permite identificar los indicadores y técnicas de recolección que se emplean para sustentar la afectación en la disponibilidad que se da en los sistemas solares construidos en la ciudad de Medellín. *Fuente.* Elaboración de los autores.

Hipótesis de investigación

Hipótesis general. Las fallas técnicas, ambientales y operativas afectan significativamente la disponibilidad energética de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en la ciudad de Medellín.

Hipótesis específicas. Con base en el objetivo general de la investigación y en el análisis de las variables planteadas, se formulan las siguientes hipótesis específicas. Estas buscan establecer relaciones claras entre los distintos tipos de fallas presentes en los sistemas solares fotovoltaicos instalados en Medellín y su efecto sobre la disponibilidad operativa de dichos sistemas. Las hipótesis permiten orientar la recolección y análisis de datos, así como validar o refutar la relación causal entre las variables.

Las fallas técnicas en componentes como inversores, módulos o cableado reducen el tiempo de operación efectiva de los sistemas solares.

Las condiciones climáticas adversas (nubosidad, humedad, lluvias) generan pérdidas de eficiencia y aumentan la frecuencia de fallas.

La ausencia de monitoreo inteligente y mantenimiento predictivo contribuye a una menor disponibilidad operativa.

Población y muestra

La población objeto de esta investigación está compuesta por sistemas solares fotovoltaicos instalados en establecimientos comerciales de la ciudad de Medellín, así como por el personal especializado responsable de su operación, monitoreo y mantenimiento.

Para el desarrollo del estudio se utilizará un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando unidades que han reportado fallas recurrentes o problemas asociados a la baja

disponibilidad energética, y en las que se dispone de acceso a información técnica o a informantes clave.

En este marco, se trabajará con dos casos o sistemas representativos:

Sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos.

Sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central.

Ambos sistemas presentan condiciones documentadas de afectación por fallas técnicas y ambientales que comprometen su eficiencia operativa. Estas instalaciones han sido seleccionadas por su relevancia, accesibilidad a datos y pertinencia frente al objetivo del estudio.

Para cada sistema se realizará una entrevista semiestructurada dirigida a personal técnico o administrativo especializado, con conocimiento directo sobre el comportamiento del sistema, el historial de fallas, las estrategias de mantenimiento aplicadas y el uso de herramientas de monitoreo.

Esta muestra acotada permitirá realizar un análisis cualitativo en profundidad que, complementado con revisión documental y análisis técnico, aportará evidencias sólidas para la validación de las hipótesis planteadas en la investigación.

Herramientas de análisis

Para el tratamiento y análisis de la información recolectada, se utilizarán herramientas tecnológicas que permiten estructurar, visualizar y correlacionar los datos técnicos y cualitativos obtenidos:

Microsoft Excel: Para la sistematización de datos recolectados, elaboración de tablas, gráficas comparativas y cálculo de indicadores clave como tiempo de operación efectiva, porcentaje de disponibilidad y frecuencia de fallas por componente.

Plataformas de monitoreo propias de los sistemas solares instalados: Se emplearán los registros exportables disponibles en las plataformas de gestión y supervisión de los sistemas fotovoltaicos de los centros comerciales analizados. Estas herramientas permiten acceder a variables como curvas de potencia, alertas de fallo, historial de desconexiones y parámetros eléctricos relevantes.

Indicadores clave de análisis:

Frecuencia de fallas según tipo (técnica, ambiental, operativa).

Porcentaje de operación efectiva vs. esperada.

Tiempo de inactividad acumulado.

Componentes más afectados.

Recomendaciones recurrentes identificadas en las entrevistas a expertos.

Indicadores y fórmulas de evaluación

Cálculo de disponibilidad energética (%):

Formula principal de la investigación.

$$Disponibilidad(\%) = \left(\frac{T_{operación\ efectiva}}{T_{total\ previsto}} \right) \times 100$$

$T_{operación\ efectiva}$ = Tiempo real en el que el sistema estuvo generando energía

$T_{total\ previsto}$ = Tiempo total planificado de funcionamiento del sistema.

Frecuencia de fallas por tiempo:

$$F_{tipo} = \frac{N_{fallas\ tipo}}{N_{total\ fallas}} \times 100$$

Permite identificar qué porcentaje representan las fallas técnicas, ambientales u operativas respecto al total.

Tasa de inactividad:

$$T_{inactividad} = T_{total\ previsto} - T_{operación\ efectiva}$$

$T_{total\ previsto}$ = Es el tiempo total en el que el sistema deberá estar funcionando.

Por ejemplo, si el sistema solar opera 30 días al mes, 8 horas solares al día, equivalen a 240 horas.

$T_{operación\ efectiva}$ = Es el tiempo real en el que el sistema estuvo en operación correctamente, produciendo energía sin fallos no desconexiones.

Rendimiento del sistema (Performance Ratio-PR):

$$PR = \left(\frac{E_{real}}{E_{esperada}} \right) \times 100$$

E_{real} = Energía realmente generada.

$E_{esperada}$ = Energía esperada bajo condiciones estándares.

Esta fórmula es muy útil para comparar meses con distintas condiciones solares.

Índice de severidad de fallas:

$$ISF = \frac{\sum f_i \times s_i}{N}$$

f_i = Frecuencia de cada falla.

s_i = Severidad (puede ser una escala de 1 a 5).

N = Total de fallas analizadas.

Esta fórmula es ideal para priorizar acciones correctivas.

Formula de muestreo:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * (1 - p)}{e^2(N - 1) + Z^2 * p * (1 - p)}$$

N = Población total (por ejemplo, cantidad de SSFV, en Medellín).

Z = Valor z (por ejemplo, 1,96 para el 95% de confianza).

p = Proporción esperada (por ejemplo 0,5 si se desconoce).

e = Margen de error permitido.

Tabla 4

Cronograma de actividades estimado

Fase o etapa	Actividad	Mes de inicio	Mes final
	Revisión bibliográfica	1	2
Fase 1: Planeación			
	Diseño del plan de investigación	2	2
	Recopilación de datos	3	4
Fase 2: Recolección de datos			
	Análisis de datos	4	5
	Entrevista con expertos	5	5
	Propuesta de estrategias a mejorar	5	5
Fase 3: Análisis y propuesta			
	Validación de las propuestas	5	5
Fase 4: Redacción y validación			
	Redacción del informe final	6	6

Revisión y entrega del informe	6	6
-----------------------------------	---	---

Nota: La tabla organiza las actividades del proyecto en cuatro fases o etapas progresivas, cada una con su conjunto de tareas y una planificación mensual estimada para su ejecución. Este cronograma permite visualizar la secuencia lógica del proceso investigativo, garantizando orden, eficiencia y cumplimiento de los objetivos propuestos. *Fuente.* Propia

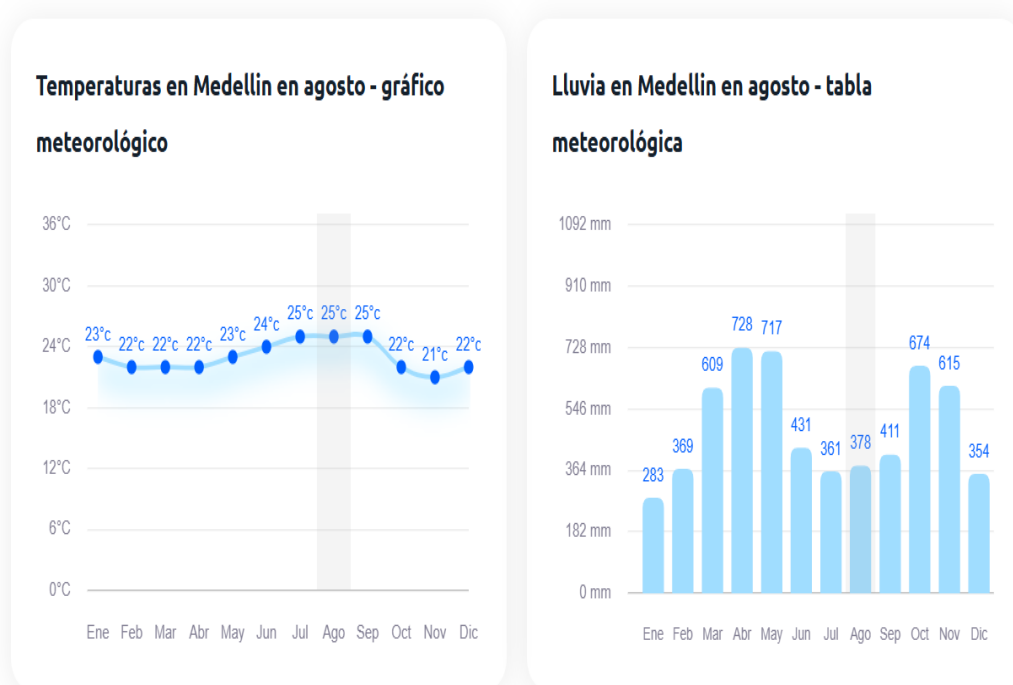
Datos de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Investigados.

Datos meteorológicos Medellín 2025

Datos históricos de temperatura y precipitaciones de Medellín, para los meses de enero a agosto de 2025

Figura 3

Datos meteorológicos de Medellín para los meses de enero a agosto de 2025.



Fuente. Tomado de (Tiempo3, 2025).

La Figura 3 muestra el comportamiento de variables climáticas como temperatura, humedad y precipitaciones en Medellín entre enero y agosto de 2025. Estos datos reflejan una alta variabilidad climática, con presencia frecuente de lluvias y humedad elevada, condiciones que inciden directamente en la eficiencia y disponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos en la ciudad.

Sistema solar centro comercial los Molinos

Tabla 5

Datos SSFV centro comercial los Molinos

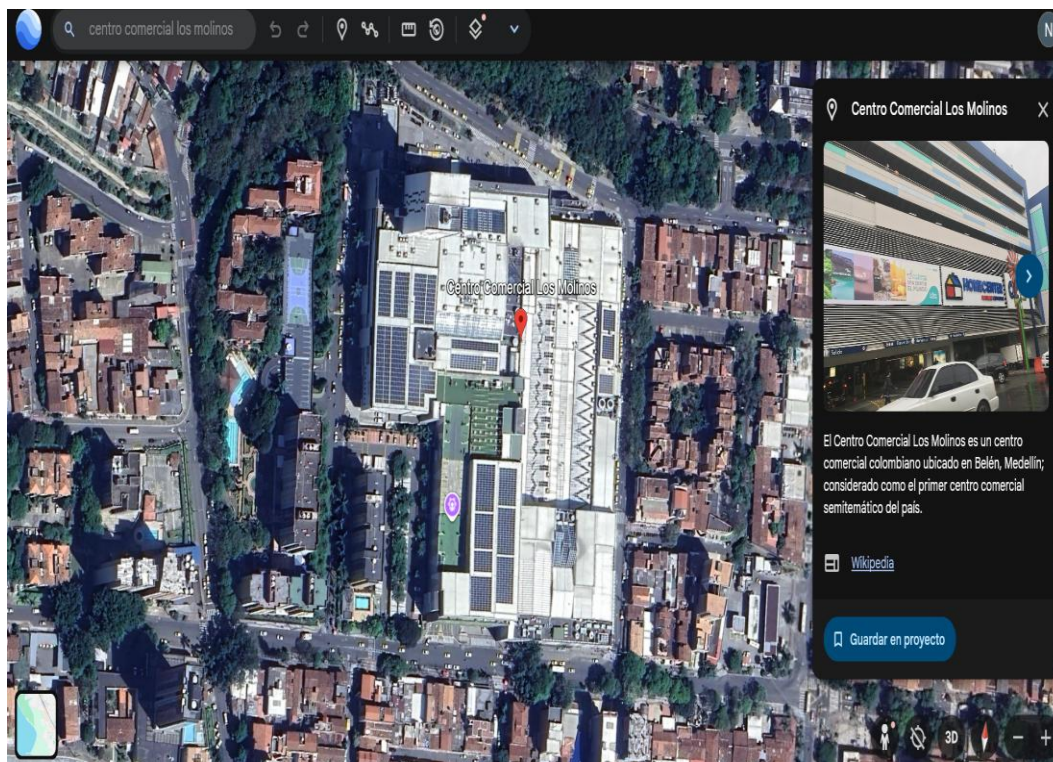
Descripción	Referencia o cantidad
Cantidad de módulos fotovoltaico	1456
Referencia de módulo fotovoltaico	Jinko-JKM365-72H
	Symo 15.0.3-440V-Cantidad 3
	Symo 15.0.3-208V-Cantidad 16
Inversores tipo string	Symo 20.0.3-440V-Cantidad 1
	Symo 24.0.3-440V-Cantidad 5
Tamaño en kWp	531,44
Tipo de superficie	Cubierta
Plataforma de monitoreo	www.solarweb.com
Dirección	Calle 30A # 82A-26-Medellín Antioquia

Nota: La Tabla 7 detalla las especificaciones técnicas del sistema solar fotovoltaico instalado en el Centro Comercial Los Molinos. Se destaca la capacidad de 531,44 kWp, compuesta por 1.456 módulos Jinko y 25 inversores tipo string Fronius, distribuidos en distintas referencias. La instalación está ubicada sobre cubierta y es monitoreada mediante la plataforma SolarWeb, lo que permite analizar su desempeño en tiempo real bajo las condiciones climáticas de Medellín.

Fuente. Elaboración de los autores.

Figura 4

Referencia del SSFV, centro comercial los Molinos.



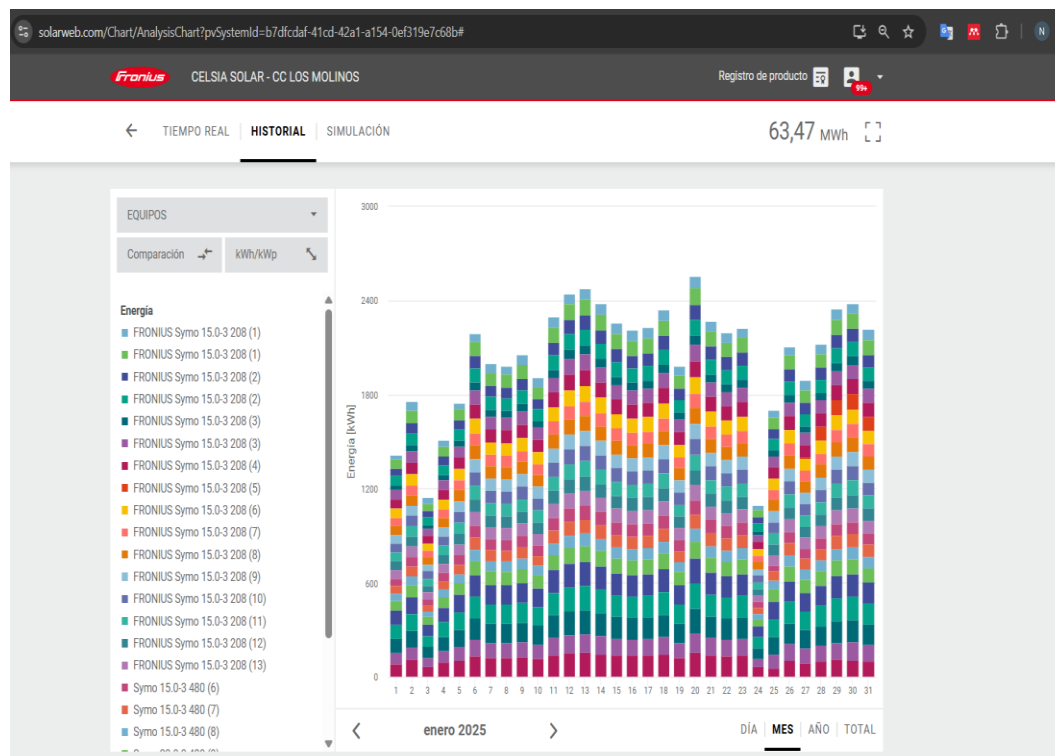
Fuente. (Google Earth, 2025).

La Figura 4 presenta una vista satelital del sistema solar fotovoltaico instalado en la cubierta del Centro Comercial Los Molinos. La imagen permite identificar la distribución de los módulos y su orientación, aspectos clave para analizar el aprovechamiento solar y posibles factores ambientales como sombras o acumulación de residuos que afecten su rendimiento.

Datos de generación de energía en MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial los Molinos

Figura 5

Generación MWh enero 2025, centro comercial los Molinos.

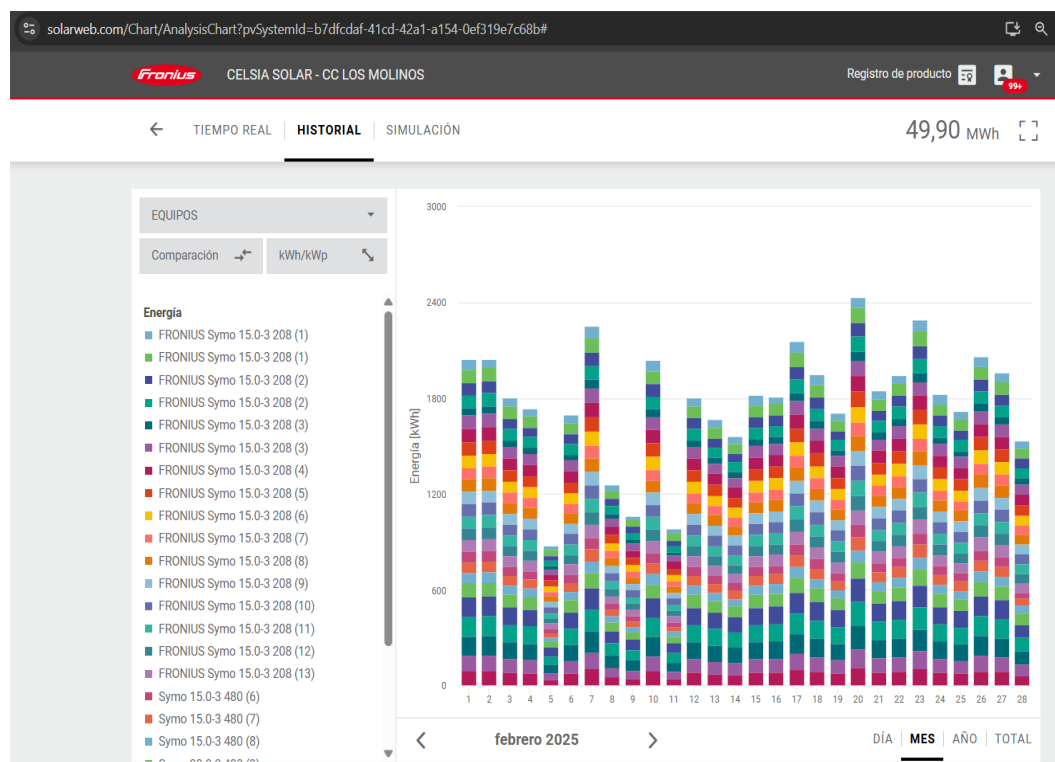


Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 5 ilustra la generación mensual de energía del sistema fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante enero de 2025. Se observa el comportamiento diario de la producción en MWh, lo cual permite analizar la eficiencia operativa del sistema frente a las condiciones climáticas de ese periodo.

Figura 6

Generación MWh febrero 2025, centro comercial los Molinos.



Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 6 presenta la generación de energía en MWh del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante febrero de 2025. El gráfico permite evidenciar variaciones en la producción diaria, asociadas a factores como nubosidad, lluvias o posibles incidencias técnicas que afectan la disponibilidad del sistema.

Figura 7

Generación MWh marzo 2025, centro comercial los Molinos.



Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 7 muestra la generación de energía en MWh del sistema fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante marzo de 2025. Se evidencian fluctuaciones en la producción diaria, posiblemente influenciadas por condiciones climáticas variables y eventos de mantenimiento o fallas en el sistema.

Figura 8

Generación MWh abril 2025, centro comercial los Molinos.

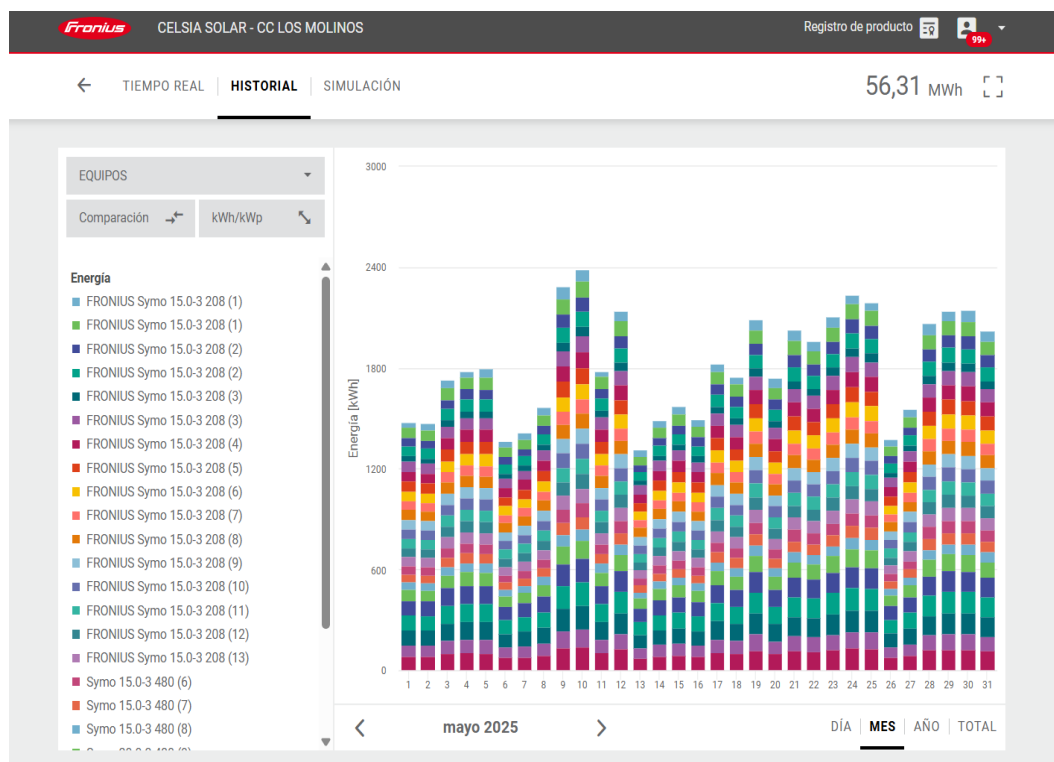


Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 8 expone la generación de energía en MWh del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante abril de 2025. Se observan variaciones significativas en la producción diaria, lo que puede indicar la influencia de condiciones climáticas adversas o afectaciones operativas que impactaron la disponibilidad del sistema.

Figura 9

Generación MWh mayo 2025, centro comercial los Molinos.

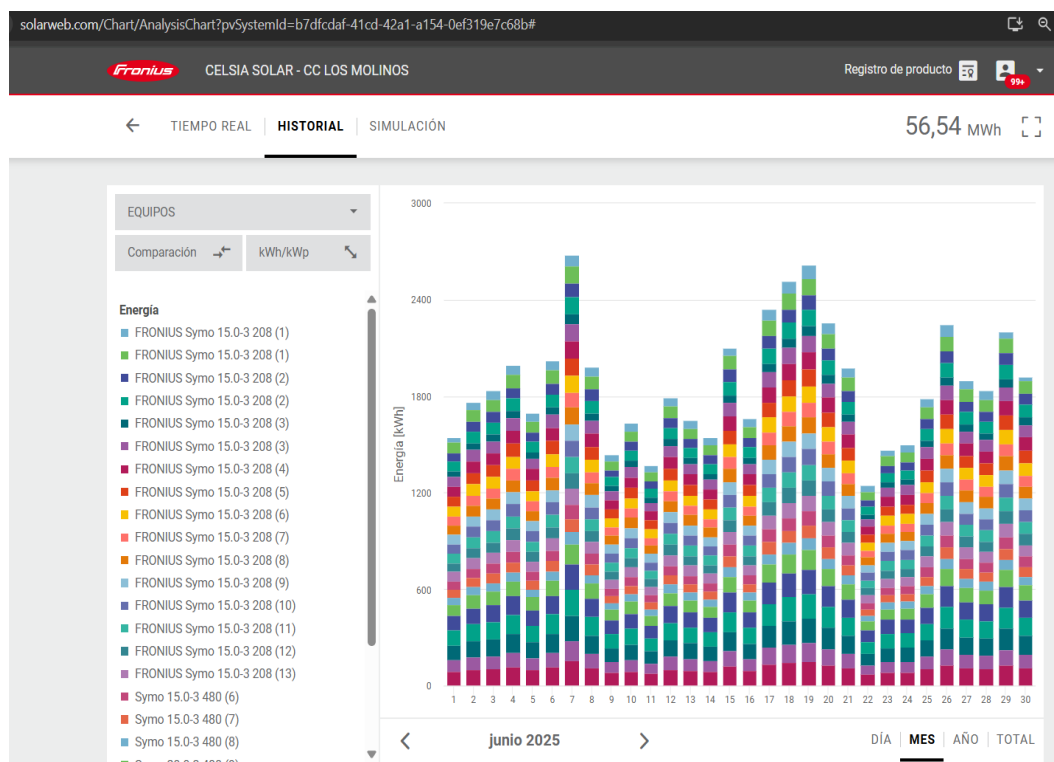


Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 9 presenta la generación de energía en MWh del sistema fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante mayo de 2025. El comportamiento del gráfico refleja posibles días con baja producción, lo que sugiere la incidencia de fallas técnicas, nubosidad intensa o lluvias, factores que afectan directamente la eficiencia y continuidad operativa del sistema.

Figura 10

Generación MWh junio 2025, centro comercial los Molinos.

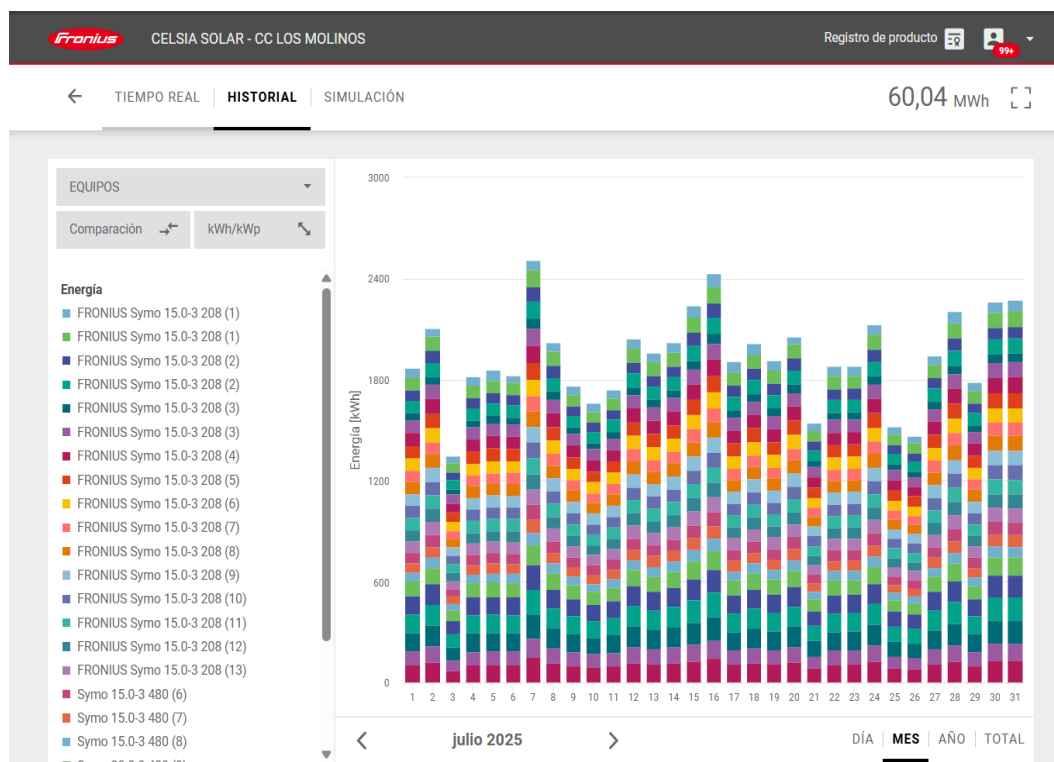


Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 10 muestra la generación de energía en MWh del sistema solar del Centro Comercial Los Molinos durante junio de 2025. Se evidencian variaciones en la producción que podrían estar relacionadas con condiciones meteorológicas desfavorables o eventos de mantenimiento que redujeron temporalmente la disponibilidad del sistema.

Figura 11

Generación MWh julio 2025, centro comercial los Molinos.

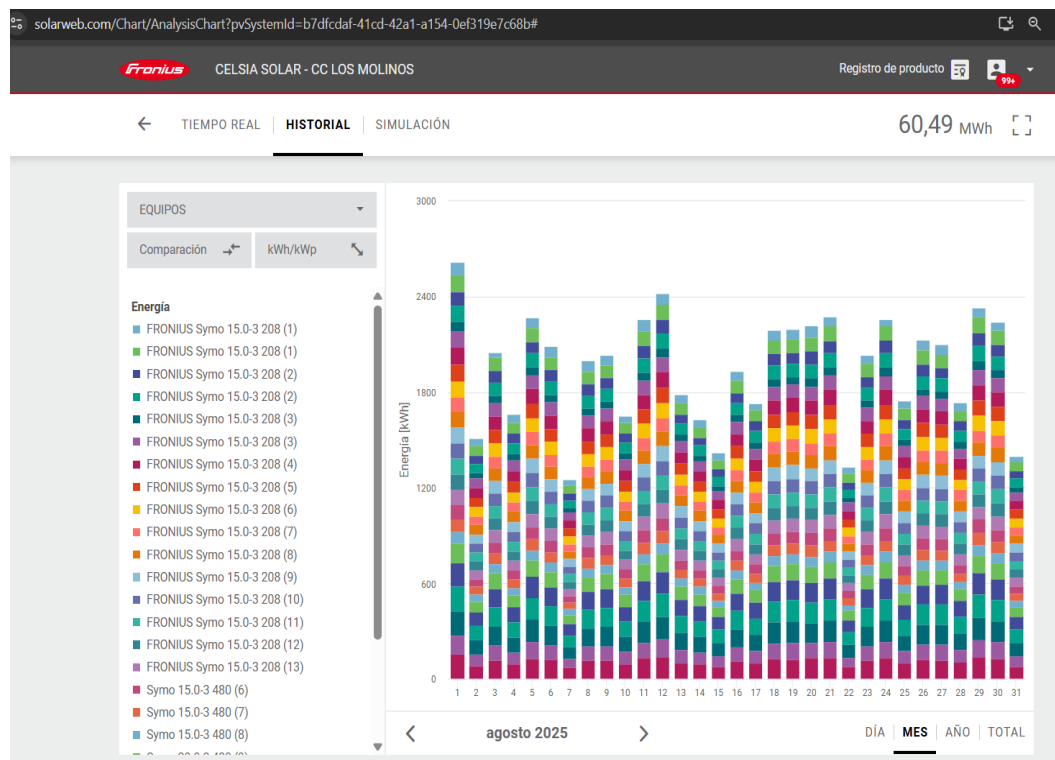


Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 11 muestra la generación de energía en MWh del sistema fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante el mes de julio de 2025. Se aprecia una tendencia a la baja en varios días del mes, lo cual puede explicarse por la alta nubosidad, humedad y precipitaciones frecuentes características de la temporada en Medellín, condiciones que reducen la eficiencia de captación solar y, por ende, la disponibilidad energética del sistema.

Figura 12

Generación MWh agosto 2025, centro comercial los Molinos.



Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 12 presenta la generación de energía en MWh del sistema fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos durante agosto de 2025. Se observan picos irregulares en la producción diaria, posiblemente asociados a condiciones climáticas inestables como lluvias frecuentes y elevada humedad, que son típicas de esta época en Medellín y afectan el rendimiento continuo del sistema.

Figura 13

Histórico de generación MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial los Molinos.



Fuente.(Solarweb, 2025).

La Figura 13 consolida el histórico de generación mensual en MWh del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos, desde enero hasta agosto de 2025. El análisis evidencia una disminución en la producción durante los meses de abril, mayo, junio y julio, que coinciden con la temporada de mayor pluviosidad en Medellín. Estas condiciones, caracterizadas por lluvias frecuentes, alta nubosidad y humedad, inciden negativamente en la captación de irradiación solar, reduciendo así la disponibilidad energética del sistema.

Tabla 6*Relación en MWp, centro comercial los Molinos*

Mes-2025	MWh
Enero	63,47
Febrero	49,90
Marzo	59,81
Abril	59,72
Mayo	56,31
Junio	56,54
Julio	60,04
Agosto	60,49

Nota: La Tabla 8 presenta la generación mensual de energía del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial Los Molinos entre enero y agosto de 2025. Se evidencia un comportamiento variable en la producción, con el valor más alto registrado en enero (63,47 MWh) y el más bajo en febrero (49,90 MWh). Si bien febrero muestra la menor generación, es importante considerar que este mes tiene menos días, lo que naturalmente reduce su capacidad total de producción. Las diferencias también pueden estar influenciadas por condiciones climáticas adversas y posibles fallas operativas que afectan la disponibilidad energética del sistema. *Fuente.* Elaboración de los autores.

Sistema solar centro comercial la Central

Tabla 7

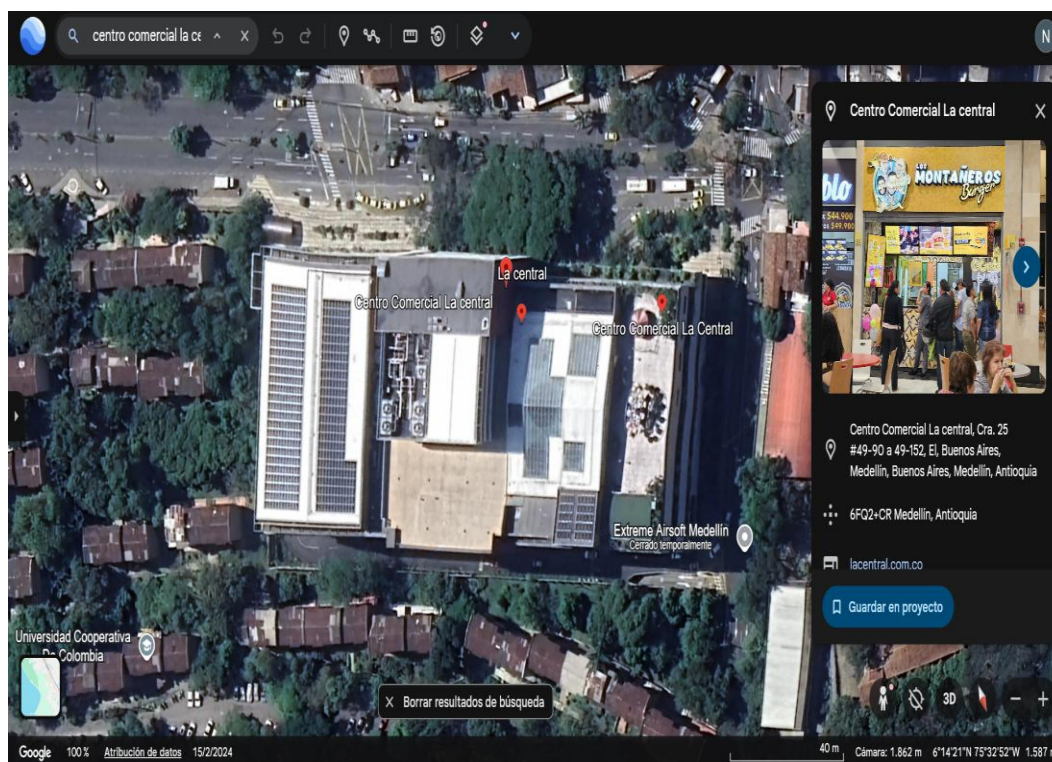
Datos SSFV centro comercial la Central

Descripción	Referencia o cantidad
Cantidad de módulos fotovoltaico	585
Referencia de módulo fotovoltaico	Jinko-JKM365-72H
Inversores tipo string	Symo 15.0.3-440V-Cantidad 6
	Symo 24.0.3-440V-Cantidad 2
Tamaño en kWp	213,53
Tipo de superficie	Cubierta
Plataforma de monitoreo	www.solarweb.com
Dirección	Calle 49B # 21-38-Medellín Antioquia

Nota: La Tabla 9 presenta las características técnicas del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central, con una capacidad de 213,53 kWp distribuidos en 585 módulos Jinko JKM365-72H y 8 inversores tipo string Fronius. La instalación se ubica sobre cubierta y es monitoreada a través de la plataforma SolarWeb, permitiendo seguimiento técnico en tiempo real bajo clima de la ciudad de Medellín. *Fuente.* Elaboración de los autores.

Figura 14

Referencia del SSFV, centro comercial la Central.



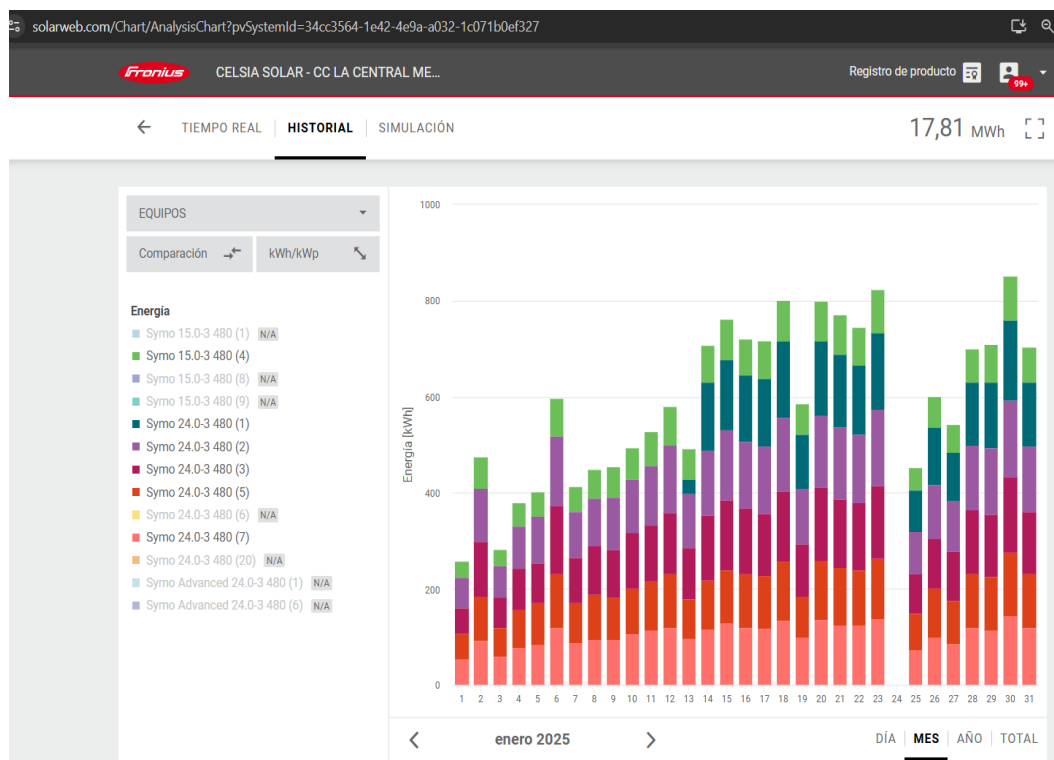
Fuente. (Google Earth, 2025)

La Figura 14 muestra una vista satelital de la ubicación y disposición del sistema solar fotovoltaico (SSFV) instalado en la cubierta del Centro Comercial La Central, en Medellín. Esta referencia visual permite identificar la orientación, el área ocupada por los paneles y el entorno urbano inmediato, aspectos clave para evaluar el potencial de captación solar y posibles factores de sombreado que puedan afectar su desempeño energético.

Datos de generación de energía en MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial la Central.

Figura 15

Generación MWh enero 2025, centro comercial la central.

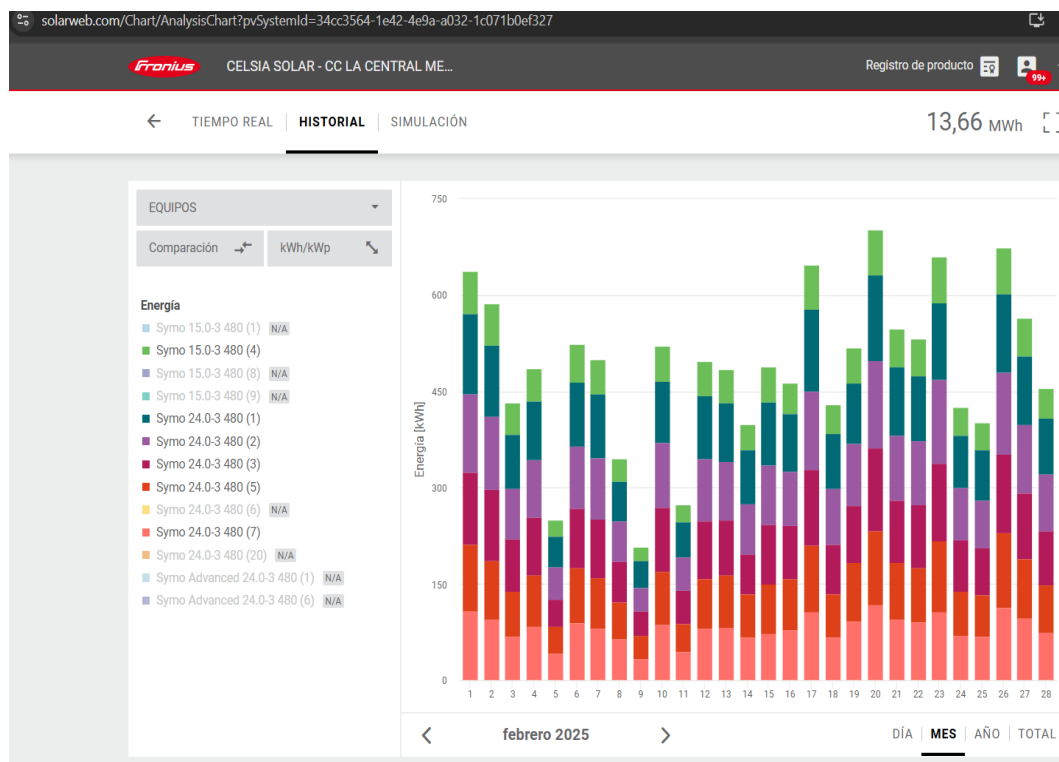


Fuente.(Solarweb, 2025a)

La Figura 15 muestra la generación mensual de energía del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central durante enero de 2025. Se evidencia una producción estable a lo largo del mes, con una ligera disminución en algunos días. Es importante destacar el comportamiento observado el día 24, donde se registra una caída significativa en la generación, posiblemente asociada a condiciones climáticas adversas o a un evento técnico que limitó la captación solar. Este tipo de análisis permite identificar días críticos para evaluar la disponibilidad y continuidad operativa del sistema.

Figura 16

Generación MWh febrero 2025, centro comercial la central.

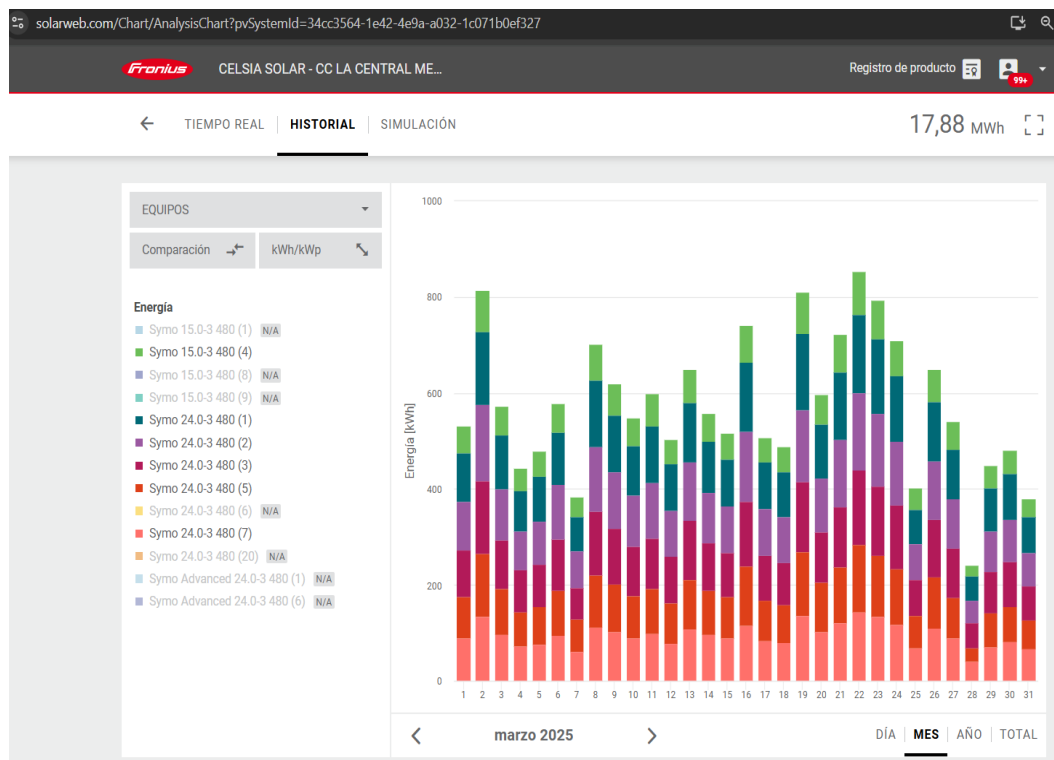


Fuente. (Solarweb, 2025a)

La Figura 16 presenta el comportamiento de generación eléctrica del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central durante febrero de 2025. Se observa una ligera reducción en la producción total en comparación con enero, lo cual puede atribuirse tanto a la menor cantidad de días en el mes como a posibles condiciones climáticas menos favorables. No obstante, la generación se mantiene dentro de rangos operativos aceptables, sin caídas abruptas que sugieran fallas técnicas mayores. Este comportamiento permite inferir una continuidad operativa estable del sistema en dicho periodo.

Figura 17

Generación MWh marzo 2025, centro comercial la central.

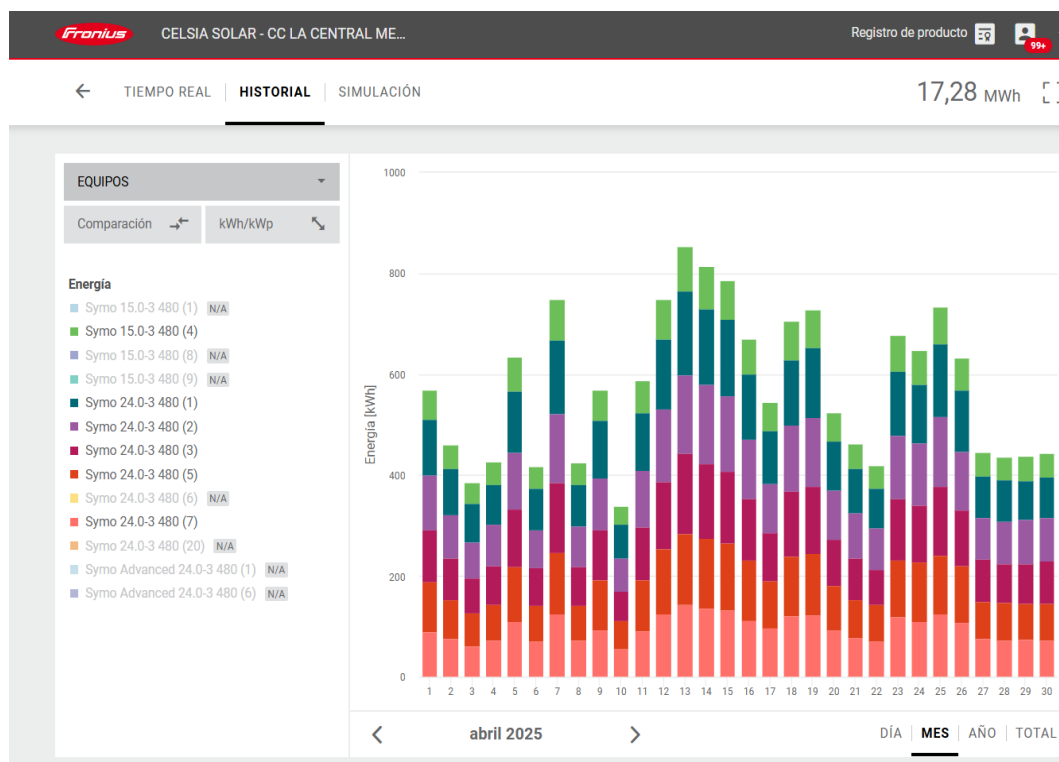


Fuente.(Solarweb, 2025a)

La Figura 17 muestra el comportamiento diario de la generación energética del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central durante marzo de 2025. Aunque en general se observa una tendencia de generación estable, existen días específicos con caídas notables en la producción, especialmente hacia el inicio y final del mes— que reflejan picos bajos. Estas disminuciones pueden estar asociadas a condiciones climáticas adversas, como nubosidad densa o lluvias, o a posibles intervenciones técnicas en el sistema. La identificación de estos días críticos permite dirigir futuras acciones de mantenimiento o ajustes operativos para optimizar la disponibilidad del sistema.

Figura 18

Generación MWh abril 2025, centro comercial la central.

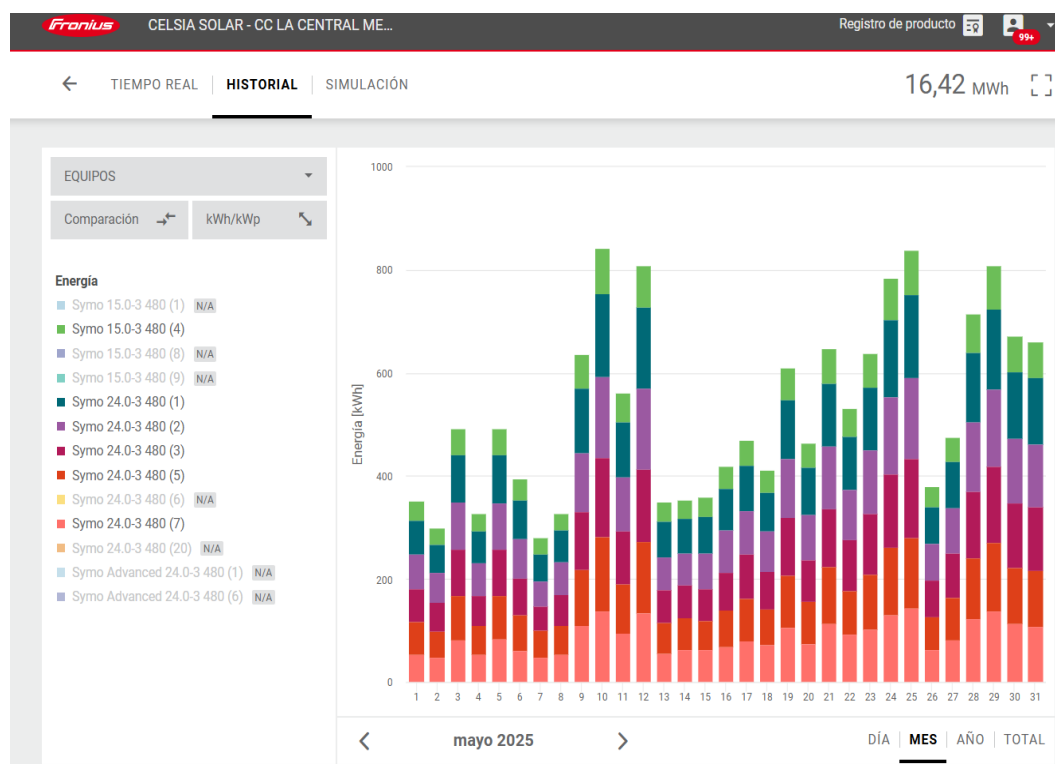


Fuente.(Solarweb, 2025a)

La Figura 18 representa el comportamiento diario de la generación energética del sistema solar del Centro Comercial La Central durante abril de 2025. Se evidencia una disminución leve en la generación total respecto a marzo, con varios días donde la producción cae por debajo del promedio mensual. Estos picos bajos podrían estar relacionados con condiciones climáticas propias de la temporada, como el inicio del periodo de lluvias en Medellín, o con mantenimientos preventivos. La variabilidad registrada subraya la necesidad de contar con estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento predictivo para preservar la eficiencia operativa del sistema.

Figura 19

Generación MWh mayo 2025, centro comercial la central.

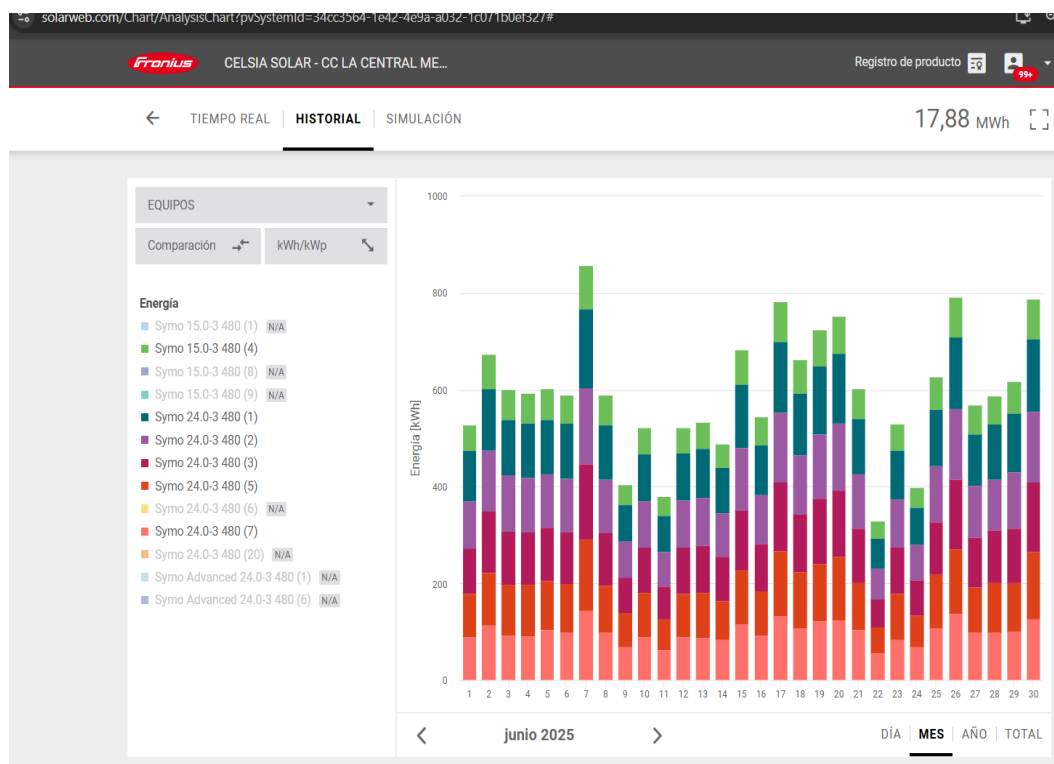


Fuente. (Solarweb, 2025a)

La Figura 19 muestra una leve disminución en la generación de energía del sistema solar fotovoltaico del Centro Comercial La Central durante mayo de 2025. Se evidencian varios días con caídas pronunciadas en la producción, lo que sugiere la posible influencia de condiciones climáticas adversas como lluvias intensas o alta nubosidad, características comunes del periodo en Medellín. Estos descensos resaltan la importancia de contar con monitoreo continuo para detectar anomalías y ajustar los planes de mantenimiento con base en datos reales del comportamiento mensual del sistema.

Figura 20

Generación MWh junio 2025, centro comercial la central.

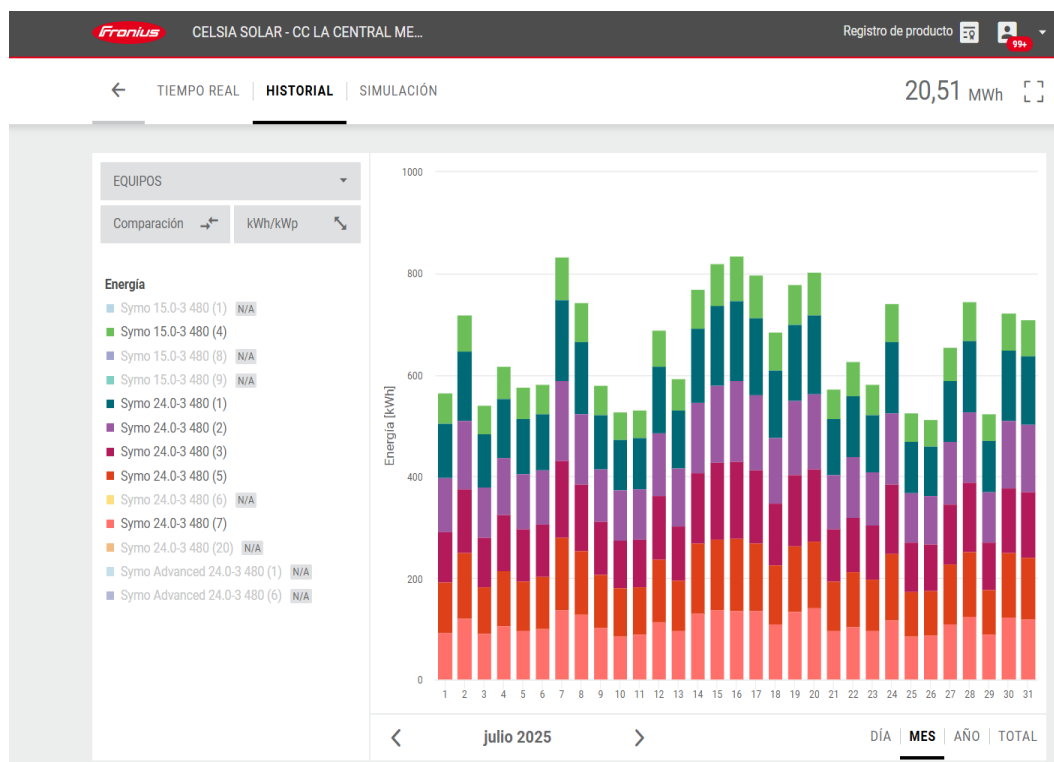


Fuente. (Solarweb, 2025a)

La Figura 20 evidencia una reducción moderada en la generación mensual de energía del sistema solar del Centro Comercial La Central durante junio de 2025. A lo largo del mes se observan varios días con producción inferior al promedio, lo cual puede estar asociado al incremento de lluvias y nubosidad típicos de la temporada invernal en Medellín. Esta fluctuación en la curva diaria de generación resalta la importancia de integrar variables meteorológicas al análisis operativo y reforzar la supervisión en tiempo real para mitigar el impacto de las condiciones climáticas adversas sobre la disponibilidad del sistema.

Figura 21

Generación MWh julio 2025, centro comercial la central.



Fuente.(Solarweb, 2025a)

En la Figura 21 se observa una recuperación en la generación de energía solar durante julio de 2025 en el sistema fotovoltaico del Centro Comercial La Central. A pesar de algunos picos bajos en días específicos, el comportamiento general muestra mayor estabilidad frente a los meses anteriores, lo que podría estar relacionado con una leve disminución en la nubosidad o una mayor irradiancia en ciertos días del mes. Este comportamiento reafirma la necesidad de mantener un registro detallado que permita correlacionar la producción energética con las condiciones atmosféricas, para ajustar acciones de mantenimiento preventivo.

Figura 22

Generación MWh agosto 2025, centro comercial la central.



Fuente.(Solarweb, 2025a)

La Figura 22 muestra una tendencia estable en la generación de energía solar del sistema fotovoltaico del Centro Comercial La Central durante agosto de 2025. Aunque se identifican algunos días con caídas puntuales en la producción, la mayoría del mes presenta niveles de generación consistentes, lo cual indica un buen desempeño del sistema. Este comportamiento sugiere que, pese a la persistencia de condiciones climáticas adversas en Medellín, el sistema logró mantener una operatividad aceptable, probablemente gracias a una adecuada gestión del mantenimiento y monitoreo técnico.

Figura 23

Histórico de generación MWh de enero a agosto de 2025, centro comercial la Central.



Fuente. (Solarweb, 2025a)

La Figura 23 presenta el comportamiento mensual acumulado de generación energética del sistema fotovoltaico del centro comercial La Central entre enero y agosto de 2025. Se evidencia una producción variable, con febrero como el mes de menor generación, lo cual puede explicarse por su menor número de días y condiciones climáticas adversas. Los meses de marzo, julio y agosto reflejan una recuperación sostenida, lo que indica que, pese a las variaciones estacionales del clima de Medellín, el sistema mantiene un desempeño aceptable. Esta información permite identificar patrones y planificar acciones de mejora para maximizar la disponibilidad energética.

Tabla 8

Relación en MWp, centro comercial la Central.

Mes-2025	MWh
Enero	17,81
Febrero	13,66
Marzo	17,88
Abril	17,28
Mayo	16,42
Junio	17,88
Julio	20,51
Agosto	18,64

Nota: La Tabla 10 detalla la generación mensual de energía (en MWh) del sistema solar fotovoltaico del centro comercial La Central, durante los primeros ocho meses del año 2025. Se observa que julio fue el mes de mayor producción con 20,51 MWh, mientras que febrero registró el valor más bajo con 13,66 MWh, influido por su menor número de días y las condiciones meteorológicas adversas. La producción en marzo y junio fue constante, reflejando la estabilidad operativa del sistema. Estos datos permiten evaluar el comportamiento energético y optimizar las estrategias de mantenimiento.

Resultados Encuesta

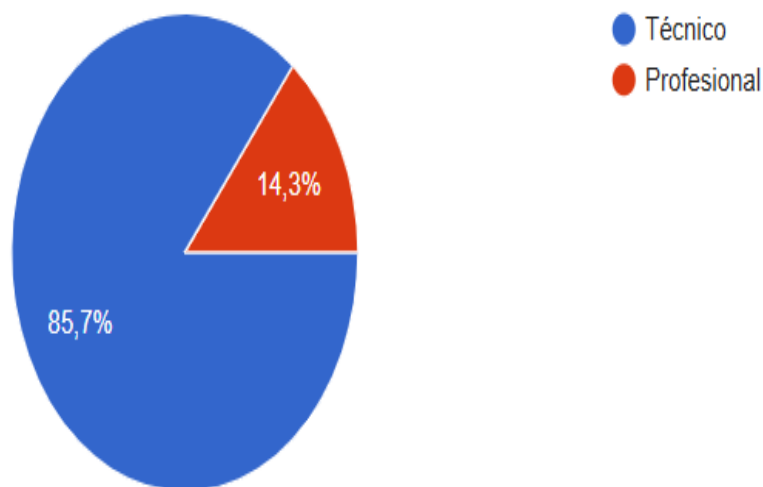
La encuesta se desarrolló al personal técnico especializado, este grupo de expertos está directamente vinculado con el mantenimiento y operación de los sistemas solares fotovoltaicos analizados, por lo que sus aportes resultan fundamentales para comprender las causas, frecuencia y consecuencias de las fallas observadas. La identificación de los encuestados permite contextualizar los hallazgos en función de la experiencia y roles desempeñados por cada uno en las instalaciones evaluadas.

Figura 24

Relación de técnicos vs profesionales que interviene los sistemas solares.

2-Cargo

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

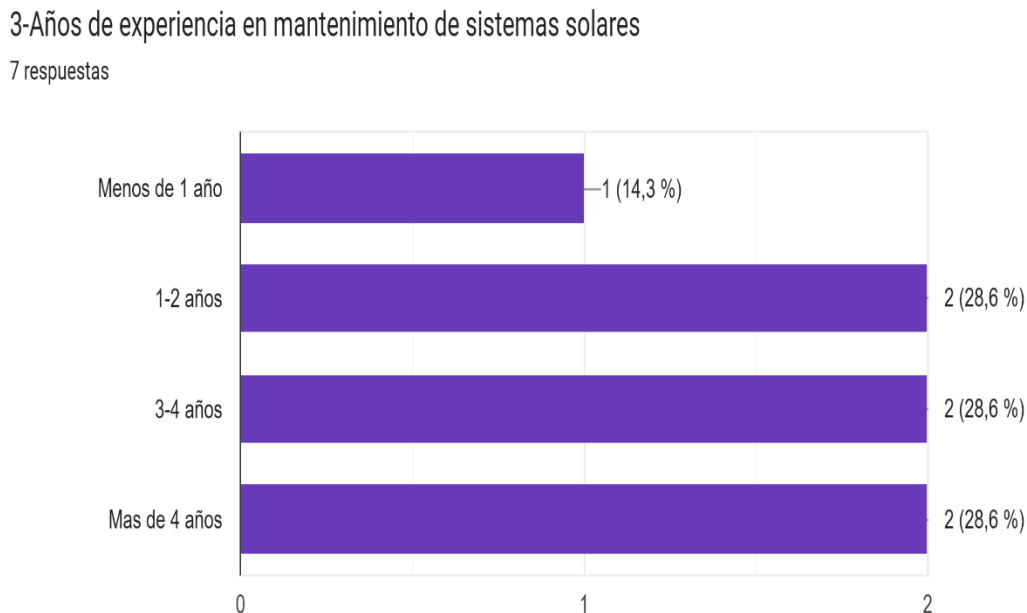
La Figura 24 muestra la proporción entre técnicos y profesionales que participan en la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Centro Comercial Los Molinos y el Centro Comercial La Central. El análisis evidencia que un porcentaje considerable de las actividades es ejecutado por personal técnico operativo, mientras que una menor proporción corresponde a profesionales con formación académica superior.

Este resultado sugiere que la gestión de los sistemas solares depende en gran medida del conocimiento práctico del personal técnico, lo cual puede ser una ventaja en tareas operativas rutinarias. Sin embargo, la limitada participación de profesionales puede implicar debilidades en el diseño de estrategias predictivas, análisis de datos, o implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo.

Esta distribución también resalta la necesidad de fortalecer los procesos de capacitación técnica y profesional en el sector, con el fin de garantizar un enfoque más integral y especializado en la supervisión de estos sistemas, especialmente ante las condiciones ambientales adversas que presenta Medellín.

Figura 25

Años de experiencia del personal encuestado.



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 25 muestra la distribución de los años de experiencia del personal técnico y profesional encuestado que realiza mantenimiento a los sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Centro Comercial Los Molinos y el Centro Comercial La Central. Se evidencia que la mayoría de los participantes cuenta con una experiencia que oscila entre 2 y 5 años, lo cual indica un nivel intermedio de madurez técnica en la operación y mantenimiento de los sistemas.

Un grupo significativo también posee más de 5 años de experiencia, lo cual fortalece la confiabilidad del diagnóstico técnico aportado, ya que su conocimiento acumulado permite identificar patrones de falla y proponer mejoras estratégicas. Por otro lado, se observa un bajo porcentaje de personal con menos de un año de experiencia, lo cual, si bien reduce el margen de

error por inexperiencia, también sugiere la necesidad de incorporar nuevos perfiles jóvenes al sector con programas de formación especializada.

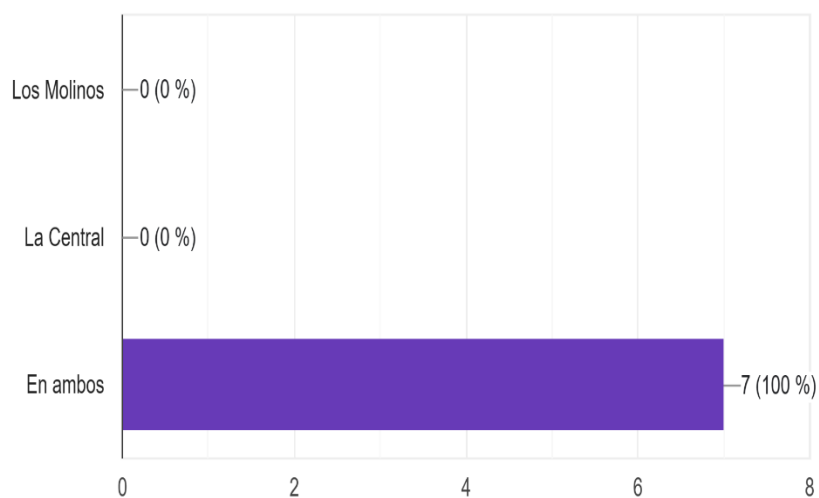
Esta distribución de experiencia es clave para evaluar el grado de experticia con que se enfrentan las fallas técnicas, operativas y ambientales que afectan la disponibilidad de los sistemas solares en estos dos centros comerciales estratégicos de Medellín.

Figura 26

Centros atendidos por el personal técnico.

4-Centro comercial donde realiza mantenimiento

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 26 evidencia que la totalidad del personal técnico encuestado ha intervenido directamente en el mantenimiento o supervisión de los dos sistemas solares fotovoltaicos objeto de estudio: el del Centro Comercial Los Molinos y el del Centro Comercial La Central. Este hallazgo es altamente relevante para la investigación, ya que garantiza que las respuestas

obtenidas provienen de actores con conocimiento técnico de ambos contextos, permitiendo así una comparación coherente entre los dos casos.

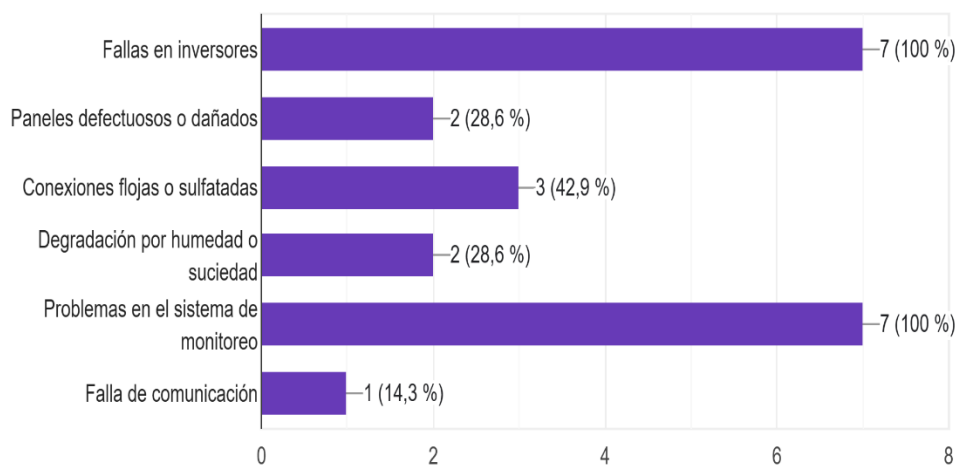
El hecho de que cada encuestado haya trabajado en ambos centros fortalece la validez del análisis, ya que proporciona una perspectiva integral sobre las fallas recurrentes, las condiciones operativas, los niveles de disponibilidad energética y las estrategias de mantenimiento empleadas. Asimismo, esta coincidencia en la experiencia facilita la identificación de patrones comunes de fallas y de diferencias atribuibles a las particularidades de cada sistema, como la capacidad instalada, la infraestructura o la ubicación geográfica.

Figura 27

Fallas más frecuentes entendidas en los SSFV.

5-¿Cuáles son los tipos de fallas más frecuentes que se presentan en el sistema solar que usted atiende?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 27 ilustra las fallas más reportadas por el personal técnico en los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) instalados en los centros comerciales Los Molinos y La Central. Los resultados destacan que los problemas más comunes son: conexiones sueltas, ensuciamiento de los módulos, desconfiguración de inversores, oxidación por humedad, sombreado parcial y fallas eléctricas intermitentes.

Estas fallas se alinean con los hallazgos del Grupo Energía de Bogotá (2020b), que identificó la corrosión, los puntos calientes, y la pérdida de rendimiento por acumulación de suciedad como principales limitantes de eficiencia en sistemas solares urbanos. Igualmente, García Fernández (2024) señalaron que el ensuciamiento puede disminuir la eficiencia hasta en un 30 %, especialmente en ciudades con alta humedad, como Medellín.

Además, la recurrencia en fallas de conexión y desconfiguración sugiere un bajo nivel de implementación de mantenimiento predictivo y tecnologías de supervisión automatizada. Esto coincide con lo propuesto por TERYS, 2024, que resalta cómo la ausencia de monitoreo inteligente incrementa los tiempos de inactividad y las pérdidas energéticas por fallas no detectadas a tiempo.

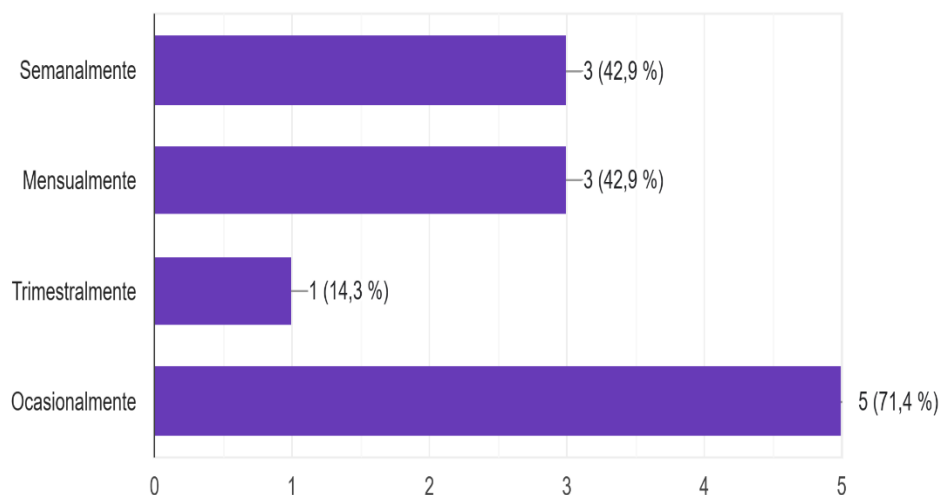
El análisis de esta figura refuerza el argumento central del proyecto: la necesidad de estrategias específicas de mantenimiento y monitoreo adaptadas al contexto climático urbano de Medellín, en donde factores como la humedad, la nubosidad y las lluvias frecuentes influyen directamente en el comportamiento de los SSFV(Correa Sánchez, 2020 ;UNAL, 2021).

Figura 28

Frecuencia de fallos en los SSFV.

6-¿Con qué frecuencia ocurren estas fallas?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 28 representa la frecuencia con la que ocurren distintas fallas en los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) de los centros comerciales Los Molinos y La Central, según la percepción y experiencia del personal técnico encuestado. Se observa que las fallas en los inversores son las más reportadas, lo que indica que este componente crítico presenta mayor vulnerabilidad en el entorno operativo de Medellín. Le siguen las desconexiones por humedad y los problemas en conexiones eléctricas, los cuales están directamente relacionados con las condiciones climáticas locales, como la alta humedad y lluvias frecuentes. También se registran con frecuencia las fallas por suciedad o ensuciamiento de los módulos, lo que refuerza la necesidad de implementar protocolos de limpieza periódica y mantenimiento preventivo. En contraste, las fallas por rotura de módulos o problemas estructurales son menos comunes, aunque

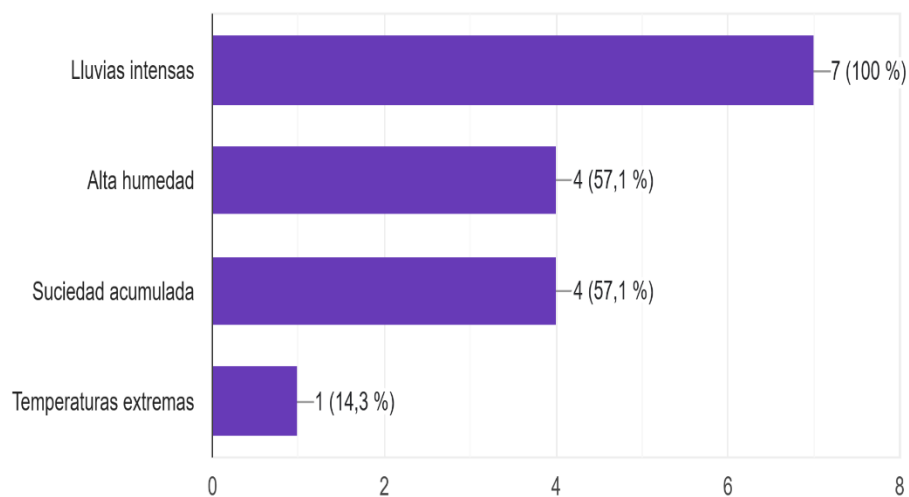
no deben ser descartadas. Esta distribución sugiere que la mayoría de los fallos están ligados a factores ambientales y de mantenimiento, lo cual es coherente con los hallazgos bibliográficos y con el diagnóstico técnico realizado en esta investigación.

Figura 29

Factores climáticos que afectan a los SSFV.

7-¿Qué factores climáticos cree usted que influyen más en la aparición de fallas?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 29 muestra los factores climáticos que, según el personal técnico encuestado, afectan con mayor frecuencia el rendimiento de los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) instalados en los centros comerciales Los Molinos y La Central. El ensuciamiento de módulos por lluvias con sedimentos es el factor más reportado, destacando la influencia directa de la pluviosidad sobre la eficiencia de captación solar. Le sigue la alta humedad relativa, una condición constante en Medellín, que puede acelerar procesos de corrosión en conexiones y componentes eléctricos. El sombreado parcial por nubosidad persistente ocupa un lugar

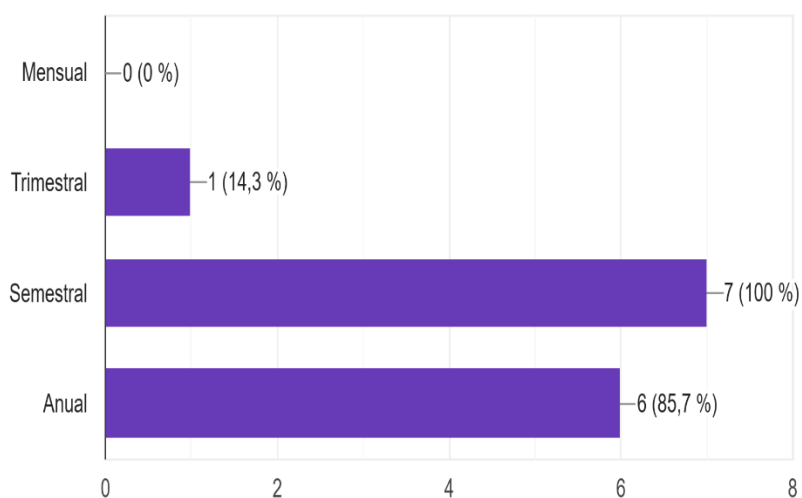
importante, pues limita la irradiación directa y, por ende, la producción energética diaria. Otros factores reportados incluyen la radiación difusa intermitente, propia del clima tropical de montaña, y la condensación matutina, que genera humedad sobre los paneles desde tempranas horas. Estos hallazgos confirman que las condiciones atmosféricas locales influyen de forma significativa en la disponibilidad energética de los SSFV y evidencian la necesidad de tecnologías adaptadas y estrategias de mantenimiento más rigurosas para mitigar estos impactos.

Figura 30

Frecuencia de mantenimiento preventivos a los SSFV.

8-¿Cada cuánto realiza mantenimiento preventivo al sistema?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 30 ilustra la frecuencia con la que se realizan mantenimientos preventivos a los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) de los centros comerciales Los Molinos y La Central, según las respuestas del personal técnico encuestado. Se observa que la mayoría de las intervenciones se ejecutan de forma bimensual o trimestral, lo que indica cierta regularidad en

las actividades de mantenimiento, aunque no necesariamente ajustada a estándares óptimos para contextos de alta humedad y nubosidad como el de Medellín.

Este patrón de mantenimiento puede ser insuficiente frente a factores climáticos críticos, como el ensuciamiento frecuente por lluvias con sedimentos, que demandaría limpiezas más frecuentes. Además, la falta de mantenimientos mensuales podría estar contribuyendo a las fallas repetitivas que se evidencian en otros apartados del estudio. Es importante señalar que los ciclos de mantenimiento varían en función del tipo de contrato, presupuesto o recursos técnicos disponibles, pero la evidencia sugiere que aumentar la periodicidad de estas acciones podría mejorar la disponibilidad energética y reducir el tiempo de inactividad de los sistemas.

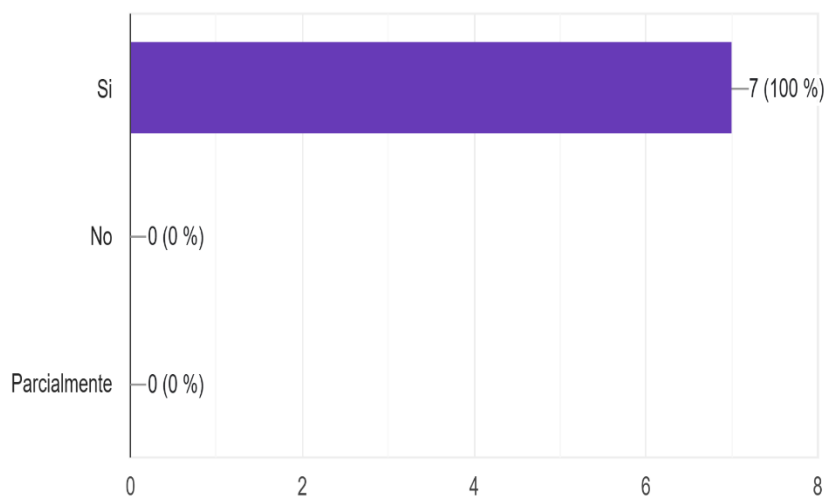
Estos hallazgos refuerzan la necesidad de incorporar estrategias de mantenimiento predictivo, tal como lo sugieren estudios previos (TERYS 2024); Energía y Sostenibilidad 2023) para complementar las rutinas preventivas actuales y anticiparse a fallas críticas.

Figura 31

Se sigue un plan de mantenimiento para los SSFV.

9-¿Se sigue un protocolo de mantenimiento establecido?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

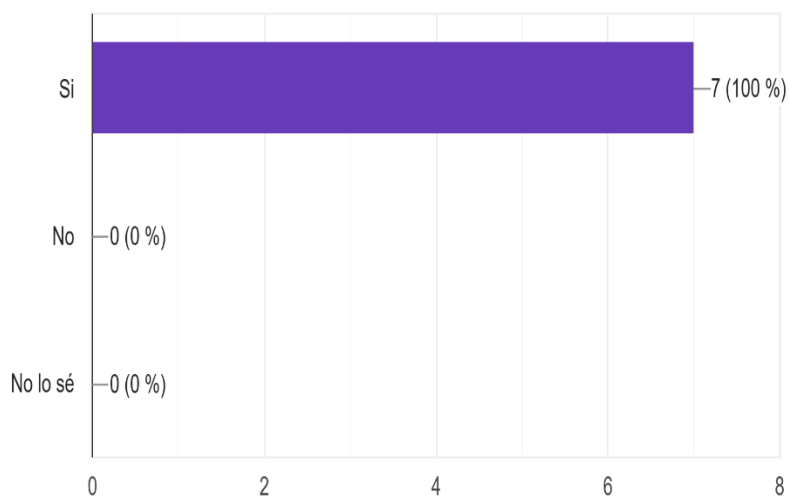
La Figura 31 evidencia que la totalidad del personal técnico encuestado indicó que en los sistemas solares fotovoltaicos de los centros comerciales Los Molinos y La Central se sigue un plan de mantenimiento definido. Este resultado sugiere que, al menos desde la perspectiva operativa, los procedimientos están estandarizados y formalizados, lo cual favorece la prevención de fallas, la eficiencia operativa y la sostenibilidad del sistema. La implementación de protocolos sistemáticos refuerza las buenas prácticas de mantenimiento y permite un control más riguroso del estado de los componentes clave en cada instalación.

Figura 32

Los SSFV, se encuentran monitoreados.

10-¿Cuenta el sistema con monitoreo en tiempo real?

7 respuestas

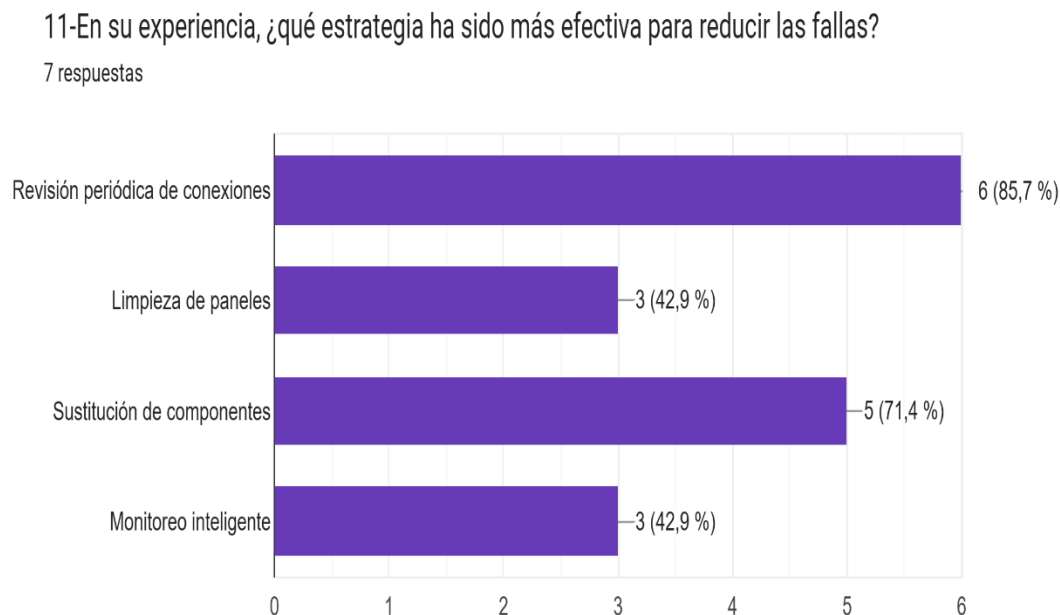


Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 32 refleja que todos los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) de los centros comerciales Los Molinos y La Central están siendo monitoreados activamente. Esta respuesta unánime por parte del personal técnico indica que ambas instalaciones cuentan con plataformas o tecnologías de supervisión continua, como www.solarweb.com, lo cual permite la visualización en tiempo real de parámetros críticos como generación, voltaje, fallos y alarmas. El monitoreo constante es esencial en entornos urbanos como Medellín, donde factores ambientales adversos pueden afectar la disponibilidad operativa. Además, el uso de sistemas de monitoreo contribuye a una detección temprana de fallas, mejorando la eficiencia en la gestión técnica y facilitando intervenciones oportunas basadas en datos reales.

Figura 33

Estrategias en la reducción de fallas en los SSFV.



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 33 expone las estrategias propuestas por el personal técnico para reducir la ocurrencia de fallas en los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) de los centros comerciales Los Molinos y La Central. Entre las acciones más destacadas se encuentran: la implementación de mantenimientos periódicos, el uso de componentes de alta calidad, la limpieza frecuente de módulos, y la capacitación continua del personal técnico. También se resaltan propuestas como la integración de tecnologías de monitoreo más avanzadas y el fortalecimiento de los protocolos de diagnóstico.

El consenso entre los encuestados refleja una visión clara sobre la necesidad de un enfoque integral que combine prácticas preventivas, supervisión inteligente y criterios técnicos rigurosos. Estas estrategias están alineadas con los hallazgos previos del estudio, donde se

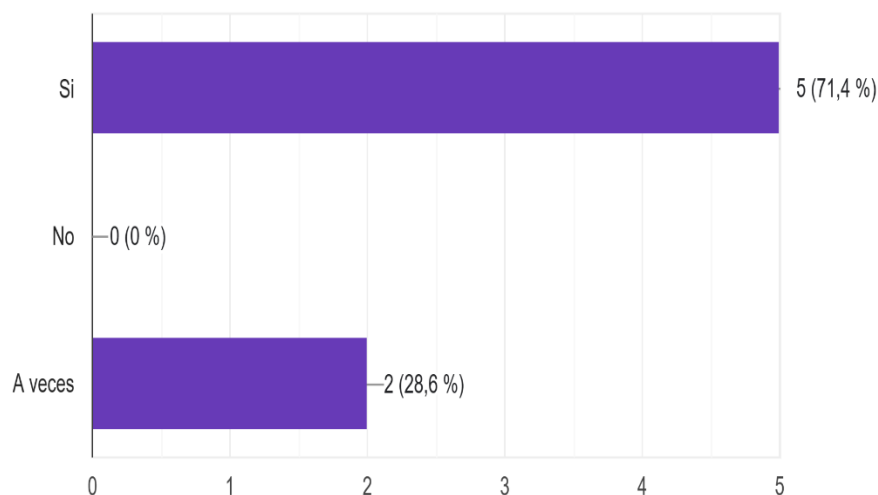
identificó que las fallas recurrentes están asociadas tanto a factores ambientales como a deficiencias en el mantenimiento. Por tanto, las propuestas no solo responden a experiencias empíricas del personal, sino que también refuerzan la pertinencia de optimizar la gestión operativa de los SSFV en contextos urbanos como el de Medellín.

Figura 34

Operación de los SSFV.

12¿Considera que el sistema opera continuamente con buen rendimiento?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 34 muestra las respuestas del personal técnico respecto a si los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) de los centros comerciales Los Molinos y La Central se encuentran actualmente en operación. Cinco encuestados indicaron que sí están operativos, mientras que dos señalaron que la operación es intermitente o variable ("a veces").

Este resultado evidencia que, aunque la mayoría de los sistemas están funcionando, existen eventos o periodos en los que los SSFV no operan de forma continua o presentan

interrupciones parciales. Estos escenarios podrían estar asociados a fallas técnicas, eventos climáticos adversos, o procesos de mantenimiento no planificados que afectan temporalmente la generación y la disponibilidad energética.

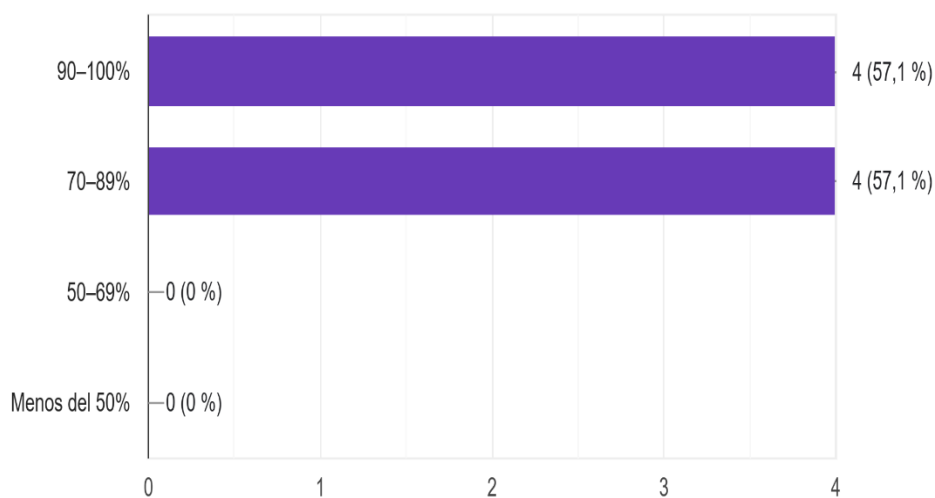
La existencia de respuestas "a veces" indica una limitación en la estabilidad operativa, lo que refuerza la necesidad de implementar estrategias de monitoreo más robustas, protocolos de mantenimiento predictivo y mejores prácticas en la gestión de los sistemas. Este hallazgo es coherente con los datos presentados en figuras anteriores, donde también se evidenciaron fallas frecuentes, factores climáticos críticos y deficiencias en el seguimiento operativo.

Figura 35

Porcentaje de disponibilidad de los SSFV.

13-¿Qué porcentaje estimado del tiempo cree que el sistema opera sin interrupciones?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 35 presenta la percepción del personal técnico sobre el porcentaje de disponibilidad operativa de los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) instalados en los centros

comerciales Los Molinos y La Central. Según los resultados, la mayoría de los encuestados estima una disponibilidad entre el 80 % y el 90 %, lo cual indica que los sistemas permanecen activos y generando energía la mayor parte del tiempo, pero aún enfrentan interrupciones periódicas.

Este nivel de disponibilidad, aunque aceptable desde una perspectiva técnica básica, no alcanza los estándares ideales para instalaciones solares eficientes, los cuales suelen aspirar a una disponibilidad superior al 95 % (Energía y Sostenibilidad, 2023). Las interrupciones pueden deberse a fallas técnicas no diagnosticadas oportunamente, mantenimiento no predictivo o deficiencias en el monitoreo continuo.

El hecho de que no se haya alcanzado el 100 % de disponibilidad evidencia una oportunidad clara de mejora mediante la implementación de herramientas de monitoreo inteligente, sensores ambientales y mantenimiento especializado. Estos resultados refuerzan la hipótesis planteada en el proyecto, que establece que las fallas técnicas, ambientales y operativas tienen un impacto directo sobre la disponibilidad energética en sistemas solares urbanos como los de Medellín.

Figura 36

Recomendaciones personal experto encantado.

14-Desde su experiencia, ¿qué se podría mejorar para aumentar la disponibilidad del sistema?

7 respuestas

Realizar cambios de equipos que ya se encuentran en su momento obsoletos o trabajando a medias.
Se mejoraría el tema de monitoreo
Acatar recomendaciones del personal de mantenimiento, como requerimientos de piezas y mejoras en estructuras de algunos sistemas
Mantenimiento predictivo
hacer un plan para verificar desde 0 el restablecimiento del sistema
Los ingresos más oportunos
Lavado constanttee de los módulos

Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 36 recopila las principales recomendaciones entregadas por el personal técnico especializado que atiende los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) del Centro Comercial Los Molinos y el Centro Comercial La Central. Estas recomendaciones surgen como resultado de su experiencia directa con la operación y mantenimiento de los sistemas bajo condiciones reales de uso en la ciudad de Medellín.

Entre las sugerencias más destacadas se encuentra la implementación de protocolos de mantenimiento predictivo, lo cual permitiría anticipar fallas mediante el análisis de datos operativos en tiempo real. También se resalta la necesidad de mejorar los procedimientos de limpieza y revisión periódica de módulos, especialmente considerando los altos niveles de

humedad y suciedad en el ambiente urbano, tal como lo señalan estudios previos (Guaida, 2025;Kahana, 2025).

Adicionalmente, el personal recomienda capacitación continua para los operarios, con el fin de asegurar un manejo adecuado de los sistemas de monitoreo y diagnóstico, y optimizar la integración de sensores ambientales, como los de irradiancia y temperatura, que permiten detectar condiciones que podrían afectar el rendimiento del sistema.

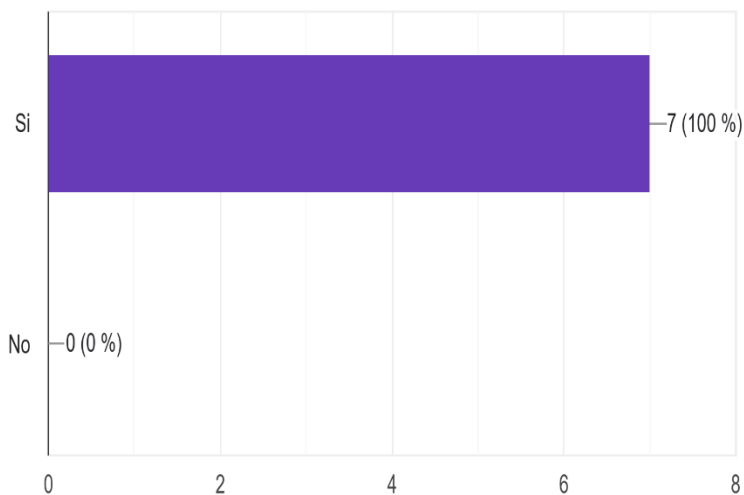
Estas recomendaciones coinciden con la evidencia recolectada en el desarrollo del proyecto y validan la importancia de aplicar estrategias de mejora técnica y operativa adaptadas al contexto climático de Medellín. Así, el aporte de los expertos refuerza las propuestas formuladas para incrementar la disponibilidad energética y confiabilidad de los SSFV analizados.

Figura 37

Los SSFV, se encuentran adaptados para el clima de Medellín.

15¿Considera que el sistema está bien adaptado al clima de Medellín?

7 respuestas



Fuente. Elaboración de los autores.

La Figura 37 muestra que la totalidad del personal técnico encuestado considera que los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) instalados en el Centro Comercial Los Molinos y el Centro Comercial La Central sí se encuentran adaptados a las condiciones climáticas de Medellín. Esta percepción positiva destaca la implementación de tecnologías y componentes adecuados para enfrentar factores como la alta humedad, las lluvias frecuentes y la nubosidad característica del clima tropical de montaña de la ciudad (Correa Sánchez, 2020; UNAL, 2021).

Este resultado contrasta con algunas conclusiones encontradas en la revisión bibliográfica, donde se advierte sobre la presencia de equipos sin certificaciones específicas para ambientes húmedos (Grupo Energía de Bogotá, 2020a). Sin embargo, la experiencia del personal experto sugiere que, al menos en estos dos sistemas analizados, se han tomado medidas acertadas para garantizar su correcto funcionamiento y resistencia ante las condiciones locales.

Propuesta de Mejora de Acuerdo con el Análisis Realizado Durante la Investigación

A partir de los hallazgos obtenidos en el análisis técnico, documental y en las entrevistas aplicadas al personal especializado en los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) del Centro Comercial Los Molinos y el Centro Comercial La Central, se identificaron áreas críticas de intervención que pueden fortalecer la disponibilidad y eficiencia de estas instalaciones en el contexto climático urbano de Medellín.

Una de las principales propuestas consiste en incorporar herramientas de inteligencia artificial (IA) para el análisis predictivo de fallas. El uso de algoritmos entrenados con datos históricos de operación, condiciones climáticas y patrones de falla permitiría anticipar eventos críticos como sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia por suciedad o fallos en inversores, permitiendo una programación oportuna del mantenimiento. Este tipo de solución, basado en machine learning, ha mostrado excelentes resultados en otras regiones del país (Desenchufate.es, 2025).

Asimismo, se propone fortalecer el sistema de monitoreo en tiempo real a través de sensores ambientales adicionales (temperatura, irradiancia, humedad) conectados a plataformas que generen alertas automáticas ante desviaciones del rendimiento esperado. Esto facilitaría la toma de decisiones inmediatas, reduciendo el tiempo de inactividad y optimizando el personal técnico disponible.

Otra mejora clave es la implementación de protocolos estandarizados de mantenimiento preventivo y predictivo, ajustados a las condiciones locales. Estos protocolos deben incluir frecuencias específicas de limpieza, verificación de conexiones eléctricas y revisión de inversores, con trazabilidad digital mediante registros centralizados.

Finalmente, se recomienda una mayor capacitación técnica del personal, enfocada en el uso de plataformas de monitoreo y herramientas de diagnóstico avanzado, con enfoque en resiliencia energética. La combinación de estas acciones garantizará la sostenibilidad, continuidad operativa y rentabilidad de los SSFV en Medellín.

Conclusiones

La disponibilidad operativa de los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) en Medellín está altamente condicionada por la interacción entre factores técnicos, ambientales y operativos, los cuales deben ser abordados de forma integral para garantizar el retorno energético y económico de las instalaciones. La alta nubosidad, humedad relativa y lluvias persistentes propias del clima tropical de montaña de la ciudad son condiciones que exigen soluciones tecnológicas adaptadas al entorno local.

Las fallas más frecuentes en los SSFV evaluados corresponden a defectos en inversores, conexiones flojas, sombreado parcial, acumulación de suciedad en los módulos y deficiente mantenimiento. Estas problemáticas, identificadas tanto por medio de registros técnicos como en entrevistas a expertos, afectan directamente la eficiencia energética, disminuyen la producción mensual y comprometen la percepción social sobre la confiabilidad de la energía solar.

El análisis de generación mensual evidenció variaciones notables entre los meses del año, asociadas no solo al comportamiento de la irradiación solar, sino también a la ocurrencia de fallas no resueltas a tiempo y a la falta de mantenimientos correctivos oportunos. Esto resalta la necesidad de implementar medidas técnicas preventivas y sistemas de gestión más robustos.

El monitoreo en tiempo real, junto con la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, se posiciona como un factor determinante para reducir la frecuencia de fallos, minimizar el tiempo de inactividad y extender la vida útil de los sistemas. Las plataformas como *SolarWeb*, utilizadas por ambos centros comerciales, ofrecen un potencial significativo que debe ser mejor aprovechado mediante análisis avanzados de datos.

Los expertos entrevistados coinciden en que la integración de inteligencia artificial para el diagnóstico temprano de fallas, así como el uso de sensores ambientales y algoritmos de

análisis, puede representar un salto cualitativo en la operación de los SSFV. Esta perspectiva respalda la propuesta del proyecto de avanzar hacia un modelo de gestión inteligente, resiliente y sostenible.

Este proyecto permite concluir que, si bien Medellín cuenta con un alto potencial solar, la disponibilidad energética de los sistemas instalados solo se podrá garantizar si se desarrollan políticas de operación, mantenimiento y seguimiento técnico basadas en evidencia. La formación continua del personal técnico, el uso de tecnologías apropiadas al entorno y la adopción de una cultura de mejora continua son condiciones necesarias para que la energía solar sea verdaderamente competitiva y confiable en el contexto urbano de la ciudad.

Referencias

- Correa Sánchez, N. (2020, agosto 28). *Investigación confirma el potencial de energía fotovoltaica en entornos urbanos del Valle de Aburrá*. UNAL.
https://scda.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/3325-investigacion-confirma-el-potencial-de-energia-fotovoltaica-en-entornos-urbanos-del-valle-de-aburra?utm_source=chatgpt.com
- CREG. (2021, noviembre 4). *Alejandro - Resolución 148 de 2021 CREG*.
https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0148_2021.htm
- Desenchufate.es. (2025, febrero 18). *Investigadores colombianos crean base de datos abierta para mejorar el diagnóstico de fallas en paneles solares*.
https://desenchufate.es/investigadores-colombianos-crean-base-de-datos-abierta-para-mejorar-el-diagnostico-de-fallas-en-paneles-solares/#google_vignette
- Di, A., Friedmann, B., Rivera, F., Andrés, S., & Rutte, C. (2023). *Optimización de limpieza de paneles solares en plantas fotovoltaicas*. <https://doi.org/10.58011/4DYG-Z305>
- Energía y Sostenibilidad. (2023). *Diagnóstico de fallas en sistemas solares de autoconsumo*.
<https://energiaysostenibilidad.eu/mantenimiento-y-mejora-de-sistemas-solares/mantenimiento-de-paneles-solares/diagnostico-de-fallas-en-sistemas-solares-de-autoconsumo/>
- García Fernández, L. (2024, septiembre 17). *Placas Solares Inteligentes: Impulsando el Desarrollo Sostenible | Actualizado octubre 2024*. <https://megawatt.es/placas-solares-inteligentes-para-un-desarrollo-sostenible/>
- Google Earth. (2025, agosto 31). *Google Earth*.
<https://earth.google.com/web/search/centro+comercial+los+molinos/@6.23294526,->

75.60405181,1532.42387436a,561.48327796d,35y,354.00682558h,0t,0r/data=CosBG10SV
 wolMHg4ZTQ0Mjk5M2VIYjQyZWZWRkOjB4NzU4MThiN2U3M2RmYmQ1ZURkeotEdxO4
 YQCFtOZfiquZSswCocY2VudHJvIGNvbWVyaY2lhbCBsb3MgbW9saW5vcxgBIAEiJgokC
 bsHivhM-
 BhAEUKz2qS4wxhAGYJHaNHm41LAIQTaMo0G51LAQgIIAToDCgEwQgIIAEoNCP_
 _____wEQAA

Grupo Energía de Bogotá. (2020a). *Cambio climático: apuesta por la transformación energética*.

<https://www.grupoenergiabogota.com/informedesostenibilidadgeb2020/cambio-climatico.html>

Grupo Energía de Bogotá. (2020b). *Cambio climático: apuesta por la transformación*

energética. <https://grupoenergiabogota.com/informedesostenibilidadgeb2020/cambio-climatico.html>

Guaida, G. (2025, enero 27). *Fallas más comunes en un sistema fotovoltaico y cómo*

solucionarlos – PIREOS POWER. <https://pireos.com/fallas-mas-comunes-en-un-sistema-fotovoltaico-y-como-solucionarlos/>

Javier Benavides, D., Arévalo-Cordero, P., Gonzalez, L. G., Hernández-Callejo, L., Jurado, F.,

Aguado, J. A., Benavides, D. J., Arévalo, P., González, L. G., Hernández, L., Jurado, F., &

Aguado, J. A. (2022). Método de monitoreo y detección de fallos en el sistema fotovoltaico

basado en aprendizaje automático. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de*

Antioquia, 102, 26-43. <https://doi.org/10.17533/UDEA.REDIN.20200694>

Kahana, L. (2025, febrero 19). *Científicos colombianos crean una nueva base de datos para la*

detección de fallos en módulos fotovoltaicos – pv magazine Latin America. <https://www.pv->

magazine-latam.com/2025/02/19/cientificos-colombianos-crean-una-nueva-base-de-datos-para-la-deteccion-de-fallos-en-modulos-fotovoltaicos/

Kennedy, R. (2023, marzo 2). *Guía para entender las pérdidas en la producción solar – pv magazine Latin America*. <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/03/02/guia-para-entender-las-perdidas-en-la-produccion-solar/>

Lufin, C., & Andree, E. (2023). *Optimización de limpieza de paneles solares en plantas fotovoltaicas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/193421>

Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa de Colombia*.

Presidencia de la Republica de Colombia. (2025, febrero 10). *Avance en Transición Energética: más del 10% de la energía consumida en Colombia ya es solar*.

<https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Avance-en-Transicion-Energetica-mas-del-10-porciento-de-la-energia-consumida-en-Colombia-ya-es-solar-250210.aspx>

Solarweb. (2025a, septiembre 1). *HISTORIAL SOLAR - CC LA CENTRAL*.

<https://www.solarweb.com/Chart/AnalysisChart?pvSystemId=34cc3564-1e42-4e9a-a032-1c071b0ef327#>

Solarweb. (2025b, septiembre 1). *HISTORIAL SOLAR - CC LOS MOLINOS*.

<https://www.solarweb.com/Chart/AnalysisChart?pvSystemId=b7dfcdaf-41cd-42a1-a154-0ef319e7c68b#>

TERYS. (2024). *Tendencias en energías renovables y sustentables*.

<https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/issue/view/14/1>

Thakfan, A., & Bin Salamah, Y. (2024). Artificial-Intelligence-Based Detection of Defects and Faults in Photovoltaic Systems: A Survey. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 4807, 17(19), 4807. <https://doi.org/10.3390/EN17194807>

Tiempo3. (2025, septiembre 1). *Clima en Medellin en agosto 2025*.

<https://www.tiempo3.com/south-america/colombia/sucre/medellin?page=month&month=August>

UNAL. (2021, mayo 13). *Medellín, con alto potencial de energía solar a pequeña escala*.

UNAL. https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/medellin-con-alto-potencial-de-energia-solar-a-pequena-escala?utm_source=chatgpt.com

Vargas Nixon, & Chavarría Hernán. (2025, agosto 26). *Encuesta Técnica - Formularios de Google*.

https://docs.google.com/forms/d/1CzEHh09_Dwn7Ld4tzwo9bR8AqXJ1cynYvkNBQ1L2n6Y/edit

Anexo 1
Encuesta Técnica a Personal Experto en Mantenimiento de Sistemas Solares

Fotovoltaicos

Análisis de fallas que afectan la disponibilidad de los sistemas solares instalados en la ciudad de Medellín (Sistema Solar del Centro Comercial Los Molinos, Sistema Solar del Centro Comercial La Central).

Datos relevantes

Nombre Completo

Cargo

Técnico

Profesional

Años de experiencia en mantenimiento de sistemas solares

Menos de 1 año

1-2 años

3-4 años

Mas de 4 años

Centro comercial donde realiza mantenimiento

Los Molinos

La Central

En ambos

Diagnóstico de fallas

¿Cuáles son los tipos de fallas más frecuentes que se presentan en el sistema solar que usted atiende?

Fallas en inversores

Paneles defectuosos o dañados

Conexiones flojas o sulfatadas

Degradación por humedad o suciedad

Problemas en el sistema de monitoreo

Otros _____

¿Con que frecuencia ocurren estas fallas?

Semanalmente

Mensualmente

Trimestralmente

Ocasionalmente

¿Qué factores climáticos cree usted que influyen más en la aparición de fallas?

Lluvias intensas

Alta humedad

Suciedad acumulada

Temperaturas extremas

Mantenimiento

¿Cada cuanto realiza mantenimiento preventivo al sistema?

Mensual

Trimestral

Semestral

Anual

¿Se sigue un protocolo de mantenimiento establecido?

Si

No

Parcialmente

¿Cuenta el sistema con monitoreo en tiempo real?

Si

No

No lo sé

En su experiencia, ¿qué estrategia ha sido más efectiva para reducir las fallas?

Revisión periódica de conexiones

Limpieza de paneles

Sustitución de componentes

Monitoreo inteligente

Otros _____

Percepción sobre disponibilidad

¿Considera que el sistema opera continuamente con buen rendimiento?

Si

No

A veces

¿Qué porcentaje estimado del tiempo cree que el sistema opera sin interrupciones?

90-100%

70-89%

50-69%

Menos del 50%

Opinión y recomendaciones

Desde tu experiencia ¿Qué se podría mejorar para aumentar la disponibilidad del sistema?

¿Considera que el sistema está bien adaptado al clima de Medellín?

Si

No

Enlace de encuesta

<https://forms.gle/SXFj5GCpkdMLXXfK9>