

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Guía para el seguimiento del mantenimiento de soluciones solares fotovoltaicas en las ZNI

Angiee Lisbeth Becerra Sandoval

Trabajo de grado para optar al título de especialista en sistemas de distribución de energía
eléctrica

Director

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, por ser mi refugio y fortaleza en cada momento de incertidumbre, por darme la sabiduría necesaria para avanzar con confianza y por recordarme cada día que los sueños, cuando se trabajan con fe, se hacen realidad.

A mi familia, por ser mi pilar inquebrantable, por su amor constante, sus palabras de aliento y sus abrazos oportunos. Gracias por enseñarme que los logros compartidos saben mejor y que el verdadero éxito se construye en unidad.

A mi abuela Teresa Ortega, su ejemplo de entrega, esfuerzo y amor ha sido una guía constante en cada paso de mi camino. Su presencia, consejo y apoyo incondicional se reflejan en cada página de este trabajo, siendo una fuente viva de inspiración y fortaleza.

A la empresa CENS, por creer en mi potencial y acompañarme con generosidad durante este proceso. Gracias por facilitar el equilibrio entre el trabajo y el estudio, y por ser un entorno donde el crecimiento personal y profesional es posible.

A cada uno de ustedes, gracias por ser parte esencial de esta etapa. Este logro no es solo mío, sino también de quienes caminaron conmigo, sosteniéndome con amor, fe y compromiso.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad Industrial de Santander, por brindarme la oportunidad de formarme en esta especialización y por ser una institución comprometida con la excelencia académica, el pensamiento crítico y el crecimiento profesional de sus estudiantes.

A mi director de trabajo de grado, Juan Manuel Rey, por su valiosa orientación, paciencia y acompañamiento a lo largo de este proceso. Su compromiso, claridad metodológica y apoyo constante fueron fundamentales para el desarrollo de esta monografía.

A la empresa CENS, por su generosidad al aportar información técnica clave que permitió estructurar esta guía de manera práctica y fundamentada. Su colaboración fue decisiva para lograr una propuesta que responda a las necesidades reales de las zonas no interconectadas.

Y a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron con su apoyo, conocimientos o palabras de aliento en este camino, mi más sincero y profundo agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Sistemas Solares FV en Zonas No Interconectadas	17
1.1. ZNI.....	18
1.2. Panel Fotovoltaico	18
1.2.1. Tecnologías de paneles	19
1.2.2. Recomendaciones para su uso y mantenimiento	22
1.3. Baterías	23
1.3.1. Áreas para la implementación de sistemas de baterías	24
1.3.2. Precauciones Generales	25
1.4. Inversores.....	26
1.4.1. Mantenimiento	27
1.5. Regulador de carga	28
1.5.1. Mantenimiento	29
1.6. Gestor de medida	30
2. Objetivos.....	33
2.1. Objetivo General.....	33
2.2. Objetivos Específicos.....	33
3. Requisitos de Mantenimiento Críticos.....	34
3.1. Limpieza Periódica de los Módulos FV.....	34
3.1.1. Herramientas Recomendadas para Limpieza.....	34
3.1.2. Pasos para Realizar la Limpieza	35

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

3.1.3. Medidas de Seguridad.....	35
3.2. Inspección visual de los componentes	36
3.3. Monitoreo del rendimiento eléctrico.....	37
3.4. Mantenimiento de las Baterías (si aplica).....	39
3.5. Revisión de Inversores y Reguladores de Carga.....	39
3.6 Ajuste de Estructuras y Fijaciones	40
3.7 Gestión de Vegetación y Sombras	41
3.8 Implementación de Monitoreo Remoto	41
3.9 Capacitación del Personal Local.....	41
4. Marco de seguimiento del Mantenimiento de Soluciones Solares Fotovoltaicas en ZNI	42
4.1. Definición de los Objetivos del Mantenimiento	42
4.2. Plan de Mantenimiento	42
4.2.1. Mantenimiento preventivo	43
4.2.2. Mantenimiento correctivo.....	43
4.2.3. Frecuencia de mantenimiento	43
4.2.4. Asignación de responsabilidades	44
4.3. Sistema de Seguimiento.....	44
4.4. Monitoreo del Rendimiento del Mantenimiento.....	45
5. Propuesta de Indicadores	46
5.1. Tasa de Fallas.....	46
5.2. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF).....	47
5.3. Tiempo Medio de Reparación (MTTR).....	47
5.4. Disponibilidad del Sistema	48

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

5.5. Eficiencia del Sistema.....	48
6. Propuesta para la Mejora continua en los Procesos de Mantenimiento.....	49
7. Conclusiones.....	51
8. Recomendaciones	53
Referencias Bibliográficas	55
Apéndices.....	61

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Tipos de baterías utilizadas en Sistemas Solares FV	25
Tabla 2 Principales datos inusuales en sistemas FV, su detección y posibles causas	39
Tabla 3 Inclinación sugerida según la latitud en Colombia	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Componentes principales de un sistema fotovoltaico en zonas no interconectadas.....	17
Figura 2. Esquema de conexión solución solar fotovoltaica aislada	31
Figura 3. Limpieza paso a paso de paneles solares.....	35
Figura 4. Esquema del flujo de monitoreo, análisis y detección de fallas en sistemas FV.....	37

Glosario

Anomalía: desviación o comportamiento inusual en los parámetros operativos de un sistema que puede indicar la presencia de fallas, errores o condiciones no esperadas que afectan su funcionamiento normal.

Armónicos: componentes de frecuencia múltiple de la señal fundamental que distorsionan la forma de onda de la corriente o el voltaje en un sistema eléctrico. Su presencia puede afectar el rendimiento de equipos sensibles y reducir la eficiencia del sistema fotovoltaico.

Autonomía: capacidad de un sistema fotovoltaico para suministrar energía de manera continua durante un período determinado sin recibir recarga solar, dependiendo principalmente del almacenamiento disponible en las baterías.

Batería: dispositivo electroquímico que almacena y libera energía eléctrica. Las baterías se clasifican en primarias (no recargables) y secundarias (recargables), y se caracterizan por su capacidad, voltaje, corriente de descarga y eficiencia de carga/descarga.

Biodegradable: material o sustancia que puede descomponerse de forma natural por la acción de microorganismos, sin causar daños al medio ambiente.

Células fotovoltaicas: dispositivos semiconductores que convierten directamente la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Son la unidad básica de los paneles solares.

Confiable: probabilidad de que un sistema, componente o equipo funcione correctamente durante un período de tiempo determinado y bajo condiciones específicas, sin presentar fallas.

Corriente: flujo de carga eléctrica que circula a través de un conductor, generado por una diferencia de potencial. En los sistemas solares puede ser continua (DC) o alterna (AC), según el punto del circuito.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Corrosión: proceso de degradación de materiales, especialmente metales, causado por reacciones químicas o electroquímicas con el entorno, como la humedad o la salinidad, que puede comprometer la integridad de componentes fotovoltaicos (FV).

Disipadores: componentes diseñados para reducir y eliminar el exceso de calor generado por equipos electrónicos, como inversores o reguladores. Mejoran la eficiencia térmica y previenen el sobrecalentamiento de los sistemas solares.

Disponibilidad: indicador que representa el porcentaje de tiempo en que un sistema o equipo se encuentra en condiciones operativas y listo para su funcionamiento, sin interrupciones ni fallas.

Eficiencia: proporción entre la energía útil generada por un sistema y la energía solar recibida. En sistemas FV, indica qué tanto de la radiación solar captada se convierte en electricidad.

Fallas: eventos o condiciones que interrumpen o disminuyen el funcionamiento normal de un sistema, componente o equipo, generando pérdida de rendimiento, interrupción del servicio o daño técnico.

Filtros: dispositivos eléctricos utilizados para atenuar o eliminar interferencias, ruidos o armónicos presentes en una señal eléctrica, mejorando la calidad del suministro y protegiendo los equipos conectados.

Guía: documento técnico o instructivo que proporciona orientaciones, procedimientos y recomendaciones estandarizadas para realizar una actividad específica, como el mantenimiento de sistemas solares FV en zonas no interconectadas.

Hot spot o puntos calientes: punto localizado en un módulo fotovoltaico donde se concentra una alta temperatura debido a sombreados parciales, suciedad o defectos internos. Puede reducir el rendimiento del panel y generar daños permanentes si no se corrige.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Incidentes: eventos no planificados que interrumpen o afectan el funcionamiento normal de un sistema fotovoltaico. Aunque no siempre causan daños graves, requieren atención inmediata para evitar consecuencias mayores.

Indicadores: medidas cuantitativas o cualitativas que permiten evaluar el desempeño, la eficiencia o el estado de un sistema, facilitando el seguimiento y la toma de decisiones en procesos como el mantenimiento de soluciones solares.

Inversor: equipo electrónico que transforma la corriente continua (CC) generada por fuentes como paneles solares o baterías en corriente alterna (CA), la forma de electricidad utilizada en la mayoría de los aparatos domésticos y redes eléctricas.

Mantenimiento: conjunto de actividades técnicas y operativas destinadas a conservar o restablecer el funcionamiento óptimo de un sistema, equipo o instalación, previniendo fallas y prolongando su vida útil.

Monitoreo: proceso continuo de recolección, análisis y registro de datos operativos de un sistema, con el fin de evaluar su desempeño, detectar anomalías y tomar decisiones de mantenimiento oportunas.

Operación: conjunto de actividades y condiciones bajo las cuales un sistema fotovoltaico funciona de manera continua para generar y suministrar energía eléctrica, cumpliendo con los parámetros establecidos de seguridad y eficiencia.

Panel solar: dispositivo fotovoltaico que agrupa un conjunto de celdas solares interconectadas eléctricamente, encapsuladas y protegidas para resistir las condiciones ambientales. Su función principal es la conversión de fotones provenientes de la luz solar en electrones, generando así una corriente eléctrica continua.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Paneles: también conocidos como módulos solares, son conjuntos de células fotovoltaicas interconectadas y encapsuladas que captan la radiación solar y la convierten en energía eléctrica.

Regulador: dispositivo que se utiliza para mantener constante una variable eléctrica, como el voltaje o la corriente, en un sistema. En el contexto de los sistemas FV, el regulador es esencial para gestionar el flujo de energía entre los paneles solares, las baterías y la carga, asegurando la protección de los componentes y la eficiencia del sistema.

Rendimiento: relación entre la energía eléctrica realmente generada por un sistema fotovoltaico y la energía que teóricamente podría producir en condiciones ideales. Es un indicador clave de eficiencia operativa.

Sensores: dispositivos electrónicos que detectan y miden variables físicas o eléctricas —como temperatura, irradiancia, voltaje o corriente— y las convierten en señales que pueden ser monitoreadas para evaluar el rendimiento del sistema fotovoltaico.

Strings: conjunto de módulos FV conectados en serie para sumar sus voltajes. Varios strings pueden interconectarse en paralelo para aumentar la corriente total del sistema.

Voltaje: también llamado tensión eléctrica, es la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito. Determina la capacidad para impulsar la corriente eléctrica a través de un conductor.

ZNI (Zonas No Interconectadas): regiones del país que no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional, por lo que dependen de soluciones energéticas locales, como sistemas solares FV, para acceder al servicio eléctrico.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Resumen

Título: Guía para el seguimiento del mantenimiento de soluciones solares fotovoltaicas en las ZNI

Autor: Angiee Lisbeth Becerra Sandoval

Palabras Clave: Panel solar, batería, inversor, mantenimiento, energía, limpieza, orientación.

Descripción: el presente documento tiene como propósito desarrollar una guía técnica para el mantenimiento de soluciones solares fotovoltaicas instaladas en Zonas No Interconectadas (ZNI), a partir de la recopilación y análisis de información proveniente de manuales de fabricantes, literatura especializada y artículos académicos. Este trabajo surge ante la necesidad de asegurar la sostenibilidad de los sistemas solares en contextos rurales y aislados, donde el acceso a energía eléctrica es limitado y el mantenimiento adecuado se convierte en un factor determinante para garantizar la continuidad del servicio.

La guía elaborada proporciona lineamientos claros sobre las actividades a realizar durante las visitas técnicas, incluyendo inspecciones visuales, limpieza de componentes, verificación de parámetros eléctricos, revisión de baterías, inversores y controladores, así como el registro sistemático de datos en bitácoras. También se incorporan indicadores clave de desempeño (KPIs) como la eficiencia del sistema, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), que permiten evaluar la efectividad del mantenimiento y la confiabilidad de la solución.

Asimismo, se proponen estrategias de mejora continua y se fomenta la adopción de tecnologías complementarias como sensores de monitoreo remoto y mecanismos de seguimiento solar. La implementación de esta guía contribuirá a la prolongación de la vida útil de los sistemas, al mejoramiento de la calidad del suministro eléctrico y a la autonomía energética de las comunidades beneficiadas, promoviendo el desarrollo sostenible en zonas marginadas del sistema interconectado nacional.

Abstract

Title: Guide for Monitoring the Maintenance of Photovoltaic Solar Solutions in Non-Interconnected Zones (ZNI)

Author(s): Angiee Lisbeth Becerra Sandoval

Key Words: Solar panel, battery, inverter, maintenance, energy, cleaning, orientation.

Description: this document aims to develop a technical guide for the maintenance of solar photovoltaic solutions installed in Non-Interconnected Zones (ZNI), based on the compilation and analysis of information from manufacturer manuals, specialized literature, and academic articles. This work arises from the need to ensure the sustainability of solar systems in rural and isolated contexts, where access to electricity is limited and proper maintenance is a determining factor in guaranteeing service continuity.

The guide provides clear guidelines for activities to be performed during technical visits, including visual inspections, component cleaning, verification of electrical parameters, and review of batteries, inverters, and charge controllers, as well as systematic data recording through maintenance logs. Key performance indicators (KPIs), such as system efficiency, Mean Time Between Failures (MTBF), and Mean Time To Repair (MTTR), are incorporated to evaluate the effectiveness of maintenance actions and the overall reliability of the system.

Additionally, strategies for continuous improvement are proposed, and the adoption of complementary technologies such as remote monitoring sensors and solar tracking mechanisms is encouraged. The implementation of this guide will contribute to extending the useful life of photovoltaic systems, improving the quality of power supply, and promoting energy autonomy among beneficiary communities. Ultimately, it seeks to support sustainable development in areas excluded from the National Interconnected System.

Introducción

El acceso a la energía es un factor clave para el desarrollo económico y social de las comunidades. En Colombia, las Zonas No Interconectadas (ZNI) representan un desafío significativo en términos de acceso confiable y sostenible a la electricidad. Dado que estas regiones no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), la generación distribuida a partir de fuentes renovables, como la solar fotovoltaica, se ha convertido en una solución viable para garantizar el suministro energético (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

Sin embargo, a pesar del avance en la implementación de soluciones solares fotovoltaicas en estas zonas, su correcto funcionamiento y sostenibilidad a largo plazo dependen en gran medida de estrategias eficientes de operación y mantenimiento (O&M). Según IRENA (2021), un mantenimiento adecuado puede extender la vida útil de los sistemas FV hasta en un 25% y optimizar su rendimiento energético. No obstante, en las ZNI existen diversas barreras que dificultan el mantenimiento adecuado de estos sistemas. Entre ellas se destacan la falta de metodologías estandarizadas, la escasez de personal capacitado, el acceso limitado a repuestos y herramientas, y la ausencia de mecanismos de monitoreo remoto que permitan la detección temprana de fallas. Estas limitaciones pueden generar una disminución en la eficiencia de los sistemas, aumentar los costos de reparación y comprometer la confiabilidad del suministro energético en estas comunidades.

En este contexto, la presente guía tiene como objetivo proporcionar un marco de referencia para el seguimiento del mantenimiento de soluciones solares fotovoltaicas en las ZNI, facilitando su gestión y optimización. A través de la recopilación de buenas prácticas y la referencia a normativas internacionales como las de la International Electrotechnical Commission (IEC, 2019)

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, 2022), se busca mejorar la eficiencia operativa y garantizar la sostenibilidad de estos sistemas a lo largo del tiempo.

Esta guía está dirigida a técnicos, operadores y entidades encargadas de la administración de sistemas solares FV en las ZNI. Se abordarán aspectos clave como la planificación del mantenimiento, las estrategias de monitoreo, la detección de fallas y las mejores prácticas para la conservación de los componentes FV.

En definitiva, la correcta implementación de estrategias de mantenimiento no solo garantizará la confiabilidad de los sistemas solares en las ZNI, sino que también contribuirá a la reducción de costos operativos y al fortalecimiento del acceso sostenible a la energía en estas comunidades. Además, el desarrollo de metodologías adecuadas de seguimiento permitirá mejorar la gestión de los recursos energéticos y fomentar el uso eficiente de las tecnologías renovables en contextos rurales y aislados.

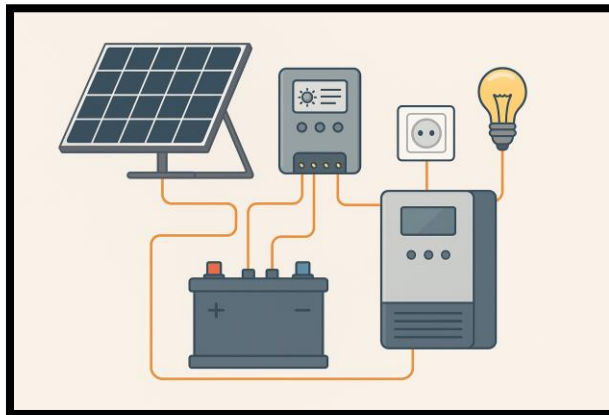
1. Sistemas Solares FV en Zonas No Interconectadas

Los sistemas solares FV en las ZNI pueden ser autónomos o formar parte de microrredes híbridas que combinan diferentes fuentes de generación, como baterías y generadores diésel, para garantizar un suministro estable. La implementación de estas soluciones ha permitido mejorar la calidad de vida de comunidades rurales, favoreciendo el acceso a servicios básicos, la educación y el desarrollo económico (IRENA, 2021).

Sin embargo, el mantenimiento de estos sistemas representa un reto significativo, ya que factores como la variabilidad climática, la acumulación de suciedad en los paneles, la degradación de los componentes eléctricos y la limitada disponibilidad de personal técnico pueden afectar su desempeño y vida útil.

El desarrollo de metodologías efectivas de mantenimiento y seguimiento en las ZNI no solo garantizará la sostenibilidad de los sistemas solares, sino que también permitirá maximizar el aprovechamiento de la energía renovable y reducir la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo así a la transición energética y al desarrollo sostenible de estas comunidades. La siguiente figura presenta los principales componentes de un sistema fotovoltaico.

Figura 1. Componentes principales de un sistema fotovoltaico en zonas no interconectadas



Nota. Imagen elaborada por inteligencia artificial con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2025).

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

1.1. ZNI

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) son regiones que no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y, por lo tanto, dependen de soluciones de generación distribuida para su suministro eléctrico. En estas áreas, la energía solar fotovoltaica ha emergido como una de las alternativas más viables, dada su disponibilidad, modularidad y sostenibilidad ambiental (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

El suministro eléctrico en las ZNI históricamente ha estado basado en generadores diésel, lo que representa altos costos de operación, dependencia de combustibles fósiles y emisiones contaminantes. Sin embargo, con el auge de las energías renovables, se ha impulsado la implementación de sistemas solares FV, que ofrecen una alternativa sostenible y económicamente viable para mejorar el acceso a la electricidad en estas comunidades (IRENA, 2021).

1.2. Panel Fotovoltaico

El panel fotovoltaico es el componente principal de un sistema solar fotovoltaico, encargado de convertir la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Está compuesto por múltiples celdas solares, generalmente fabricadas con materiales semiconductores como el silicio monocristalino, policristalino o amorfo, los cuales permiten la generación de corriente eléctrica cuando son expuestos a la luz solar (IEA, 2021).

El rendimiento de un panel fotovoltaico depende de diversos factores, entre ellos la calidad del material semiconductor, la eficiencia de conversión de la celda, la orientación e inclinación del panel, la intensidad de la radiación solar y la temperatura de operación. Para maximizar su eficiencia, los paneles deben instalarse en lugares con alta exposición solar y con una inclinación óptima según la latitud geográfica de la zona (IEC, 2019).

1.2.1. Tecnologías de paneles

1.2.1.1. Paneles Monocristalinos

Eficiencia y características: los paneles solares monocristalinos se distinguen por su elevada eficiencia, atribuida a su fabricación a partir de células compuestas por un único cristal de silicio. Esta característica estructural facilita un flujo más eficiente de electrones, mejorando así el rendimiento del sistema fotovoltaico (*Guerrero Pérez, s.f., p. 82*).

1.2.1.2. Paneles Policristalinos

Eficiencia y características: los paneles solares policristalinos presentan una eficiencia ligeramente inferior en comparación con los monocristalinos, debido a la presencia de múltiples cristales de silicio en cada célula, lo que dificulta el flujo de los electrones. Esta característica estructural impacta en el rendimiento global del panel, situando su eficiencia en un rango generalmente menor. Según Torres-Pacheco, Jurado-Pérez, Granados-Lieberman y Lozano-Luna (2018), este tipo de paneles alcanza niveles de eficiencia que oscilan entre el 11 % y el 16 % bajo condiciones estándar de radiación solar.

1.2.1.3. Paneles de Película Delgada (Thin-Film)

Eficiencia y características: los paneles solares de película delgada representan una alternativa innovadora frente a los paneles tradicionales de silicio cristalino, destacándose por su flexibilidad, ligereza y capacidad de adaptación a una variedad de superficies. Según IEEE spectrum (Patel, 2022), los recientes desarrollos tecnológicos han permitido fabricar módulos ultradelgados que se pueden aplicar directamente sobre textiles o materiales ligeros, transformando casi cualquier superficie en un generador fotovoltaico. Aunque su eficiencia puede ser menor en comparación con los paneles convencionales, su facilidad de instalación y bajo peso los hacen ideales para aplicaciones móviles o en estructuras que no pueden soportar grandes cargas.

1.2.1.4. Paneles Bifaciales

Eficiencia y características: los paneles solares bifaciales tienen la capacidad de captar radiación solar tanto en su superficie frontal como posterior, aumentando así la cantidad de energía capturada en comparación con los paneles monofaciales tradicionales. De acuerdo con el estudio de *Comparative study of bifacial versus monofacial PV systems at the global scale (2023)*, el rendimiento de estos sistemas puede mejorar de manera significativa, particularmente cuando se combinan con condiciones de alta reflectividad del suelo, conocidas como albedo. En escenarios óptimos de albedo e inclinación, los sistemas bifaciales pueden superar a los monofaciales en eficiencia energética en un rango que varía aproximadamente entre un 10 % y un 20 %. Asimismo, el estudio resalta que la ganancia energética depende de factores como la ubicación geográfica, el tipo de suelo, la altura de instalación y la orientación de los paneles. Estas características hacen que los módulos bifaciales sean una opción atractiva para proyectos FV que buscan maximizar la producción energética a nivel mundial

1.2.1.5. Paneles de Perovskita

Eficiencia y características: los paneles solares de perovskita han emergido como una alternativa altamente prometedora en el ámbito de la energía fotovoltaica, debido a su notable eficiencia y al potencial de bajo costo en su producción. Desde su introducción en 2009, cuando apenas alcanzaban una eficiencia de conversión de energía cercana al 3 %, estos dispositivos han experimentado avances significativos, logrando superar el 25 % de eficiencia en configuraciones de laboratorio a pequeña escala (U.S. Department of Energy, s.f.).

Una de las configuraciones más destacadas corresponde a las células solares en tándem, donde la perovskita se combina con el silicio tradicional. Esta estrategia ha permitido alcanzar eficiencias certificadas superiores al 33,7 %, superando incluso el límite teórico de eficiencia de

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

las células de unión simple, conocido como el límite de Shockley-Queisser (Wang et al., 2019; Green et al., 2020).

La estructura de las perovskitas ofrece propiedades ópticas y electrónicas favorables, como una alta movilidad de electrones y una fuerte absorción de luz, lo que contribuye de manera directa a su alta eficiencia energética (Green et al., 2020). Además, su facilidad de fabricación en películas delgadas posibilita la creación de paneles ligeros, flexibles y adaptables a diferentes aplicaciones, desde dispositivos portátiles hasta grandes instalaciones solares.

Sin embargo, uno de los principales desafíos de esta tecnología radica en su estabilidad y durabilidad. Estudios recientes indican que algunos compuestos utilizados en las capas de las perovskitas tienden a degradarse bajo condiciones ambientales adversas, como la exposición prolongada a la humedad, el oxígeno y la radiación ultravioleta, afectando su rendimiento a largo plazo (Wang et al., 2019).

1.2.1.6. Paneles Híbridos (PVT – Fotovoltaico-Térmico)

Eficiencia y características: los paneles solares híbridos, conocidos como sistemas PVT (fotovoltaico-térmicos), integran la generación simultánea de electricidad y calor en un solo dispositivo. Según Zondag (2008), esta tecnología combina una célula fotovoltaica con un colector térmico, lo que permite aprovechar no solo la radiación solar para la producción de energía eléctrica, sino también el calor residual que usualmente se perdería en un panel fotovoltaico convencional.

Una de las principales ventajas de los sistemas PVT radica en su alta eficiencia global. Mientras que un módulo fotovoltaico estándar puede ver reducida su eficiencia debido al aumento de temperatura, en los sistemas híbridos, el calor es extraído por un fluido térmico, lo que contribuye a mantener más baja la temperatura de las células y, a su vez, mejora su rendimiento

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

eléctrico. Esta doble utilización de la energía solar puede resultar en una eficiencia combinada que supera el 70 % bajo condiciones óptimas.

Además, los sistemas PVT son especialmente útiles en aplicaciones donde tanto la electricidad como el calor son necesarios, como en edificios residenciales, hospitales, y procesos industriales de baja temperatura. No obstante, su diseño debe ser cuidadosamente ajustado para equilibrar la producción eléctrica y térmica, ya que priorizar uno de estos aspectos puede afectar el otro.

En resumen, los paneles solares híbridos PVT representan una solución efectiva para maximizar el aprovechamiento de la energía solar, aunque su implementación requiere consideraciones técnicas específicas para alcanzar su máximo potencial de desempeño (Zondag, 2008).

1.2.2. Recomendaciones para su uso y mantenimiento

- Limpieza Regular:
 - Limpiar la superficie del panel solar regularmente para eliminar polvo, suciedad y otros residuos que puedan reducir la eficiencia del panel.
 - Utilizar agua y un paño suave o una esponja para limpiar el panel. Evitar el uso de detergentes fuertes o abrasivos que puedan dañar la superficie del panel.
- Inspección Visual:
 - Realizar inspecciones visuales periódicas para detectar cualquier daño físico, como grietas en el vidrio, conexiones sueltas o cables dañados.
 - Verificar que no haya sombras permanentes sobre el panel, ya que esto puede afectar su rendimiento.
- Verificación de Conexiones:

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y libres de corrosión.
- Inspeccionar los cables y conectores para asegurarse de que estén en buen estado y no presenten signos de desgaste o daño.
- Monitoreo del Rendimiento:
 - Utilizar un sistema de monitoreo para verificar el rendimiento del panel solar. Esto ayudará a identificar cualquier disminución en la eficiencia y tomar medidas correctivas.
 - Revisar los indicadores de rendimiento y asegurarse de que el panel esté generando la cantidad esperada de energía.
- Protección Contra Elementos:
 - Asegurar que el panel fotovoltaico esté instalado en un lugar donde esté protegido contra condiciones climáticas extremas, como fuertes vientos, granizo o nieve.
 - Verificar que el panel tenga resistencia a la niebla salina y al amoníaco, lo cual es importante para su durabilidad en ambientes extremos.

Estas recomendaciones se basan en la información técnica proporcionada por Jinko Solar Co., Ltd. (2020).

1.3. Baterías

Uno de los componentes más importantes de un sistema solar fotovoltaico son las baterías, ya que son las encargadas de almacenar la energía que generan los paneles solares y convertirla en electricidad disponible cuando se necesita (Guerrero Pérez, 2015). Hay diferentes tipos de baterías y su principal diferencia está en la capacidad, ciclos de carga y descarga, además del material con el que están fabricadas.

Entre las opciones más comunes para almacenar energía están:

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Baterías de plomo-ácido (Pb-ácido)
- Níquel-cadmio (Ni-Cd)
- Níquel-zinc (Ni-Zn)
- Baterías de litio (Li)

De todas estas, más del 90% de las que se usan en sistemas solares son de plomo-ácido, ya que son económicas y, con un buen mantenimiento, funcionan muy bien en sistemas FV (Guerrero Pérez, 2015). Sin embargo, en los últimos años los fabricantes se han enfocado en mejorar y comercializar las baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄), que pertenecen a la familia de las de ion litio. Esto se debe a que son más seguras, tienen mayor estabilidad y una vida útil más larga, lo que las convierte en una excelente alternativa para sistemas de energía renovable (Guerrero Pérez, 2015).

Las baterías están formadas por varios elementos: un electrodo positivo, uno negativo, separadores que evitan que estos se toquen, un electrolito que permite el paso de corriente, una carcasa que protege todo el conjunto y unos terminales de conexión para la carga. Gracias a estos componentes, la batería es capaz de transformar la energía química que almacena en energía eléctrica que se puede utilizar (Guerrero Pérez, 2015).

1.3.1. Áreas para la implementación de sistemas de baterías

- Áreas sin suministro eléctrico: puede cargarse con paneles solares y usarse para iluminación nocturna (Guerrero Pérez, 2015).
- Áreas con servicio de energía eléctrica de costo elevado: puede cargarse durante períodos de bajo costo y usarse en períodos de alto costo.
- Áreas con cortes de energía frecuentes: puede funcionar como un UPS para evitar la pérdida de información (Guerrero Pérez, 2015).

Tabla 1 Tipos de baterías utilizadas en Sistemas Solares FV

Tipo de batería	Características principales	Ventajas	Desventajas
Plomo-Ácido	Tecnología madura, bajo costo, requiere mantenimiento.	Económicas, fiables.	Peso elevado, menor vida útil.
Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Buena tolerancia a temperaturas extremas, resistente a descargas profundas.	Larga vida útil, soportan cargas rápidas.	Costosas, problema ambiental (cadmio tóxico).
Níquel-Zinc (Ni-Zn)	Alta densidad de energía, menor impacto ambiental que Ni-Cd.	Más ecológicas, buen rendimiento.	Vida útil menor que otras tecnologías.
Litio (LiFePO ₄)	Alta eficiencia, baja autodescarga, mayor seguridad térmica.	Larga vida útil, ligeras, seguras.	Costo inicial más alto.

Nota. Datos adaptados de *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas* (Guerrero Pérez, 2015).

1.3.2. Precauciones Generales

Según las recomendaciones más comunes que suelen indicar los fabricantes, se deben tener en cuenta las siguientes precauciones para garantizar un uso seguro y prolongado de las baterías (UU Energy, 2021):

- Evitar el agua: nunca arrojar agua a la batería. Mantener la batería en un lugar seco, sombreado y fresco cuando no esté en uso.
- Polaridad correcta: no invertir los polos positivo y negativo.
- Evita el contacto con metales: no conectar los polos positivo y negativo de la batería con metal. No transportar ni almacenar la batería junto con metales.
- Manipulación cuidadosa: no golpear, arrojar ni pisar la batería. No cortar la batería con herramientas afiladas.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Temperatura: no usar ni mantener la batería a altas temperaturas. La temperatura recomendada para el almacenamiento a largo plazo es de 10-45°C.
- Evita el fuego: nunca arrojar la batería al fuego o a una máquina de calefacción para evitar incendios, explosiones y contaminación ambiental.
- Campos estáticos y magnéticos: no usar la batería en campos estáticos o magnéticos fuertes, ya que esto puede dañar el dispositivo de protección.
- Fugas: si la batería presenta fugas y el electrolito entra en contacto con los ojos, lavarlos con agua y acudir al hospital.
- Anomalías: si la batería emite un olor peculiar, se calienta, se deforma o presenta cualquier anomalía durante el uso, almacenamiento o carga, retirarla del dispositivo y dejar de usarla.

1.4. Inversores

Dado que tanto los paneles FV como las baterías suministran energía en forma de corriente continua (DC), es indispensable incorporar un inversor dentro del sistema fotovoltaico. Este dispositivo tiene la función de convertir la corriente continua en corriente alterna (AC), permitiendo así el uso de equipos eléctricos convencionales, como sistemas de iluminación, electrodomésticos y motores, que operan bajo esta forma de energía. Los parámetros que caracterizan a un inversor incluyen la potencia nominal, la tensión nominal, la capacidad de sobrecarga, la eficiencia y la forma de onda. Existen topologías monofásicas y trifásicas; la diferencia entre ellas radica, como su nombre indica, en que los inversores monofásicos suministran energía a una fase, mientras que los inversores trifásicos lo hacen a tres fases.

En el caso de utilizar un inversor en una solución solar fotovoltaica conectada a la red, es fundamental prestar especial atención a los armónicos, su amplitud y orden. Es crucial disponer

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

de elementos que contribuyan a eliminarlos o atenuarlos, ya que pueden causar desperfectos en todo el sistema.

La elección de la potencia del inversor debe ser 1.2 veces la potencia requerida por las cargas de corriente alterna, garantizando así el arranque continuo de todos los equipos.

Los inversores autónomos, componentes esenciales en los sistemas FV, deben satisfacer una serie de criterios fundamentales para garantizar su óptimo desempeño e integración. En primer lugar, se requiere que garanticen una elevada eficiencia, minimizando las pérdidas energéticas durante la conversión de corriente. Adicionalmente, es imprescindible que su diseño incorpore protecciones robustas y eficaces contra cortocircuitos y sobrecargas, salvaguardando la integridad del sistema y previniendo posibles daños. Finalmente, estos dispositivos deben ser capaces de admitir demandas de potencia instantáneas que superen significativamente su capacidad nominal, idealmente en un rango del 200%, asegurando así la estabilidad del suministro eléctrico ante variaciones abruptas en la carga. (Trashorras Montecelos, 2021)

1.4.1. Mantenimiento

Se recomienda realizar las siguientes inspecciones y tareas de mantenimiento al menos dos veces al año para obtener el mejor rendimiento:

Ventilación:

- Asegurarse de que no haya obstrucciones en el flujo de aire alrededor del inversor.
- Limpiar cualquier suciedad y fragmentos en el radiador.

Inspección de cables:

- Revisar todos los cables desnudos para asegurarse de que la aislación no esté dañada por exposición solar, desgaste por fricción, sequedad, insectos o roedores.
- Reparar o reemplazar los cables si es necesario.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Indicadores y pantallas:

- Verificar y confirmar que los indicadores y pantallas sean consistentes con lo requerido.
- Prestar atención a cualquier indicación de error o problema y tomar medidas correctivas si es necesario.

Terminales:

- Confirmar que todos los terminales no tengan corrosión, aislación dañada, alta temperatura o signos de quemaduras/descoloración.
- Apretar los tornillos de los terminales al torque sugerido.

Limpieza:

- Revisar y limpiar cualquier suciedad, insectos anidando y corrosión. Si es necesario, limpiarlos a tiempo.

Pararrayos:

- Verificar y confirmar que el pararrayos esté en buen estado. Reemplazarlo por uno nuevo a tiempo para evitar daños al inversor/cargador y otros equipos.

Para la elaboración de las recomendaciones relacionadas con la instalación, operación y mantenimiento del inversor, se tomó como referencia el *Manual del inversor de onda sinusoidal pura* proporcionado por el fabricante Huizhou EPEVER Technology Co., Ltd.

1.5. Regulador de carga

Las baterías, debido a sus intrínsecas características de carga y descarga, y la exigencia de mantener una tensión de operación estable en los paneles solares, hacen imprescindible la incorporación de un regulador en la solución energética solar. Este dispositivo desempeña un papel fundamental en la protección de la batería, previniendo tanto la sobrecarga como la descarga

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

excesiva, procesos que deben ajustarse a los límites especificados por cada fabricante en sus respectivos manuales técnicos.

En cuanto a la tipología de los reguladores, se pueden clasificar en dos grandes grupos: los reguladores lineales, que controlan el flujo de corriente hacia la batería (configuración en serie) o disipan la energía excedente en forma de calor mediante una resistencia de bajo valor (configuración en paralelo) una vez que la batería alcanza su nivel de carga óptimo; y los reguladores conmutados, los cuales operan desconectando la batería del generador a través de un interruptor. (Guerrero Pérez, 2016)

1.5.1. Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento que se detallan a continuación se deben llevar a cabo en cada uno de los componentes especificados.

Instalación:

- Asegurarse de que el regulador esté firmemente instalado en un ambiente limpio y seco.
- Verificar que no haya obstrucciones en el flujo de aire alrededor del regulador. Limpiar cualquier suciedad y fragmentos en el disipador de calor.

Inspección de cables:

- Revisar todos los cables desnudos para asegurarse de que la aislación no esté dañada por exposición solar, desgaste por fricción, sequedad, insectos o roedores.
- Reparar o reemplazar los cables si es necesario.

Terminales:

- Apretar todos los terminales. Inspeccionar si hay conexiones de cables sueltas, rotas o quemadas.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Confirmar que todos los terminales no tengan corrosión, aislación dañada, alta temperatura o signos de quemaduras/descoloración. Apretar los tornillos de los terminales al torque sugerido.

Indicadores LED:

- Verificar y confirmar que los indicadores LED sean consistentes con lo requerido.
- Prestar atención a cualquier indicación de error o problema y toma medidas correctivas si es necesario.

Conexión a tierra:

- Confirmar que todos los componentes del sistema estén conectados a tierra de manera correcta y segura.

Limpieza:

- Limpiar la suciedad, insectos anidando y corrosión a tiempo.

Pararrayos:

- Verificar y confirmar que el pararrayos esté en buen estado. Reemplazarlo por uno nuevo a tiempo para evitar daños al regulador y otros equipos.

Para la elaboración de las recomendaciones técnicas relacionadas con la instalación, operación segura y mantenimiento del controlador solar, se tomó como base el *Manual del usuario del controlador de carga solar MPPT serie XTRA N*, desarrollado por Beijing Epsolar Technology Co., Ltd.

1.6. Gestor de medida

Funcionalidades y Beneficios (Engenius, 2021)

- Adaptabilidad: el gestor es adaptable a diferentes sistemas FV y puede funcionar con comunicación a la nube o sin ella.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Monitoreo: capaz de recolectar, almacenar y extraer datos para monitorear eventos, estado de funcionamiento e identificar fallos de forma anticipada.
- Control de energía: permite administrar la energía en zonas no interconectadas y controlar el uso del sistema fotovoltaico mediante una tarjeta inteligente.
- Seguridad: incorpora encriptación y seguridad en la comunicación entre el dispositivo y la tarjeta inteligente.

A continuación, se presenta un prototipo de conexión usado en 282 soluciones solares fotovoltaicas que fueron instaladas por el gobierno nacional en ZNI del área de influencia de CENS, donde se evidencian las partes que componen el módulo solar.

Figura 2. Esquema de conexión solución solar fotovoltaica aislada



GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI



2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar una guía para el seguimiento y vigilancia del mantenimiento de soluciones individuales solares fotovoltaicas en las ZNI, aplicada a CENS como operador de red.

2.2. Objetivos Específicos

Identificar los requisitos de mantenimiento críticos para las soluciones individuales solares fotovoltaicas en las ZNI.

Establecer un marco de seguimiento para las actividades de mantenimiento que pueda ser implementado por CENS.

Desarrollar indicadores que permitan evaluar la efectividad del mantenimiento de estas soluciones energéticas.

Proponer recomendaciones para la mejora continua en los procesos de mantenimiento y seguimiento.

3. Requisitos de Mantenimiento Críticos

3.1. Limpieza Periódica de los Módulos FV

La acumulación de polvo (también conocida como suciedad) y excrementos de aves en la superficie de los paneles solares reduce la cantidad de luz solar que llega a las células fotovoltaicas, lo que afecta gravemente la eficiencia del panel solar. Para aprovechar al máximo su capacidad de diseño, es necesario limpiarlos periódicamente, generalmente con agua. Para evitar que las aves depositen residuos en los paneles, se pueden instalar antenas en la parte superior que impidan que se posen sobre ellos. (De la Cruz Gómez, 2015, p. 56)

En la actualidad, el polvo y la suciedad se han convertido en un tema crucial de investigación, ya que tienen un impacto significativo en la eficiencia de conversión. Si se emplean mecanismos de limpieza adecuados, se puede lograr hasta un 25 % de mejora en la energía de salida o un aumento del 15 al 20 % en la eficiencia de conversión. (Jaiganesh et al., 2021)

A continuación, se presentan los insumos necesarios, el procedimiento recomendado paso a paso y las medidas de seguridad que deben tenerse en cuenta durante la limpieza de los módulos FV. El uso de herramientas adecuadas y la aplicación de prácticas seguras permiten realizar esta tarea de manera eficiente, evitando daños al sistema y garantizando un óptimo desempeño energético (Sunrun, s.f.).

3.1.1. Herramientas Recomendadas para Limpieza

- Cepillo de cerdas suaves con mango largo (especial para paneles solares).
- Manguera con boquilla de aspersión.
- Balde con agua.
- Detergente suave (biodegradable, sin cloro ni amoníaco) o limpiador sin jabón.
- Esponjas o cepillos sin jabón (diseñados para superficies solares).

3.1.2. Pasos para Realizar la Limpieza

1. Apagar el sistema fotovoltaico antes de iniciar.
2. Llenar un balde con agua y detergente suave.
3. Desde el suelo, frotar suavemente los paneles con el cepillo de mango largo.
4. Enjuagar usando una manguera con boquilla de aspersion.
5. Si hay suciedad adherida, utilizar esponjas o cepillos suaves adicionales.
6. Verificar visualmente el estado del panel después de la limpieza.

Figura 3. Limpieza paso a paso de paneles solares.



Nota. Imagen elaborada por inteligencia artificial con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2025).

3.1.3. Medidas de Seguridad

- Apagar el sistema fotovoltaico antes de cualquier intervención.
- Usar herramientas con mango largo para evitar subirse al techo.
- Si requiere más alcance, utilizar una escalera estable y arnés de seguridad, acompañado por otra

persona.

- Usar calzado con suela de goma para evitar deslizamientos.

3.2. Inspección visual de los componentes

La inspección visual sistemática de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico —como los módulos, estructuras de soporte, cableado, protecciones y conexiones— constituye una actividad fundamental dentro del mantenimiento preventivo. Este procedimiento permite identificar de manera temprana daños físicos, corrosión, signos de desgaste o defectos superficiales que, si no se abordan oportunamente, pueden derivar en fallas mayores o en una reducción significativa del rendimiento energético del sistema.

Diversos estudios destacan que la inspección visual representa el método más económico y accesible para detectar anomalías visibles tales como grietas, decoloraciones, delaminaciones, corrosión o la presencia de puntos calientes (*hot spots*), lo que refuerza su papel esencial en las rutinas de mantenimiento (Reinders et al., 2018). Asimismo, investigaciones recientes han evidenciado que factores ambientales como la humedad, la radiación ultravioleta y la exposición a ambientes salinos aceleran el proceso de corrosión en marcos y conectores, incrementando el riesgo de degradación prematura del sistema (Rana et al., 2025).

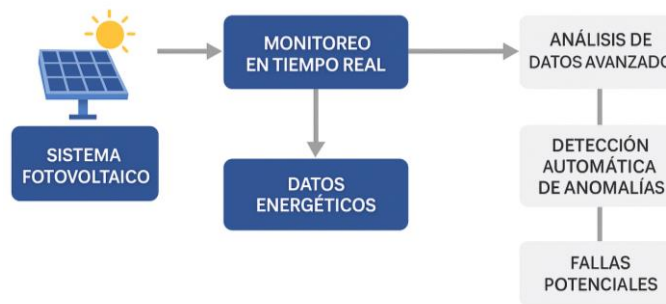
En este contexto, organismos internacionales han desarrollado guías y listas de verificación detalladas que permiten estandarizar las evaluaciones de campo (Packard et al., 2012). Por ejemplo, el Manual de Operación y Mantenimiento de LONGi recomienda realizar inspecciones mensuales durante el primer año de operación y, posteriormente, al menos cada seis meses, ajustando la frecuencia según las condiciones ambientales del sitio (LONGi, 2024).

Una lista detallada de los criterios de inspección visual y acciones a realizar se incluye en el Apéndice A como parte del formato técnico de revisión que abarca elementos clave del sistema, tales como baterías, reguladores, estructuras e inversores.

3.3. Monitoreo del rendimiento eléctrico

El monitoreo del rendimiento eléctrico es una práctica esencial para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas FV, ya que permite comparar la generación real de energía con los valores esperados y detectar de forma temprana anomalías, degradaciones o fallas operativas. Esto se logra mediante la recolección sistemática de datos como energía producida, voltajes, corrientes e indicadores de disponibilidad.

Figura 4. Esquema del flujo de monitoreo, análisis y detección de fallas en sistemas FV.



Nota. Imagen elaborada por inteligencia artificial con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2025).

En el caso de CENS, se lleva a cabo un seguimiento continuo de los consumos eléctricos cada vez que los usuarios recargan sus tarjetas a través de los gestores disponibles. En ese momento, se descarga automáticamente el historial de datos del sistema fotovoltaico, incluyendo variables como voltajes, corrientes, niveles de disponibilidad, consumos registrados e interacciones con el gabinete.

Este enfoque es coherente con métodos automatizados de detección de anomalías basados en series temporales eléctricas. Por ejemplo, Miraftebzadeh et al. (2025) proponen un modelo no supervisado mediante autoencoders (redes neuronales profundas) que detecta desviaciones

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

inusuales en datos temporales de producción fotovoltaica, facilitando la predicción de fallas o comportamientos anómalos.

Para aplicaciones más avanzadas, Abdelsattar et al. (2025) aplican técnicas modernas de aprendizaje automático—como Random Forest y CatBoost—forzar el pronóstico de la generación de energía y la detección de fallas.

Estos estudios evidencian que el uso de monitoreo en tiempo real, combinado con análisis de datos avanzados, permite anticiparse a fallas y mejorar el mantenimiento, lo que a su vez mejora la confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas.

La siguiente tabla resume las principales variables monitoreadas, los tipos de anomalías que pueden registrarse, sus posibles causas técnicas y su utilidad como indicadores de mantenimiento preventivo en sistemas solares FV. Adaptado de Abdelsattar et al. (2025) y Miraftabzadeh et al. (2025).

Tabla 2 Principales datos inusuales en sistemas FV, su detección y posibles causas

Variable monitoreada	Anomalia detectada	Posible causa
Caída súbita en la potencia	Producción inferior a la esperada en condiciones normales de irradiancia	Ensuciamiento de módulos, sombreado inesperado, desconexión parcial
Disminución del voltaje DC	Voltaje bajo en los módulos en comparación con días similares	Celdas dañadas, PID (degradación inducida por potencial), sombreado parcial
Corriente fuera de rango	Corrientes nulas o excesivamente bajas en uno o más strings	Desconexión de strings, fusible fundido, cortocircuito
Diferencias entre strings	Variaciones anormales de producción entre strings del mismo arreglo	Módulo defectuoso, cableado dañado, conexión suelta
Temperatura anormal del módulo	Aumento no justificado de temperatura en ciertos módulos	Hot spot, mala ventilación, fallo interno del módulo
Frecuencia de interrupciones	Cortes repetitivos o reinicios del sistema	Problemas en inversor, protecciones sensibles, mal dimensionamiento
Distorsión armónica alta	Armónicos elevados en salida del inversor	Falla en filtros, interferencia externa, conexión inadecuada
Valores erráticos o nulos	Pérdida de registros o lecturas erráticas en el sistema de monitoreo	Fallo de sensores, errores de comunicación, batería interna baja

Nota. Adaptado de Abdelsattar et al. (2025) y Miraftabzadeh et al. (2025).

3.4. Mantenimiento de las Baterías (si aplica)

En sistemas híbridos o aislados con almacenamiento, se debe realizar la verificación de niveles de electrolito (en baterías de plomo-ácido), inspección de terminales y pruebas de capacidad para evitar fallas prematuras.

3.5. Revisión de Inversores y Reguladores de Carga

Se deben evaluar su correcto funcionamiento, temperatura de operación y estado de los disipadores de calor para evitar sobrecalentamiento y fallos.

3.6 Ajuste de Estructuras y Fijaciones

La estructura que soporta el panel solar es tan crucial como el panel mismo, ya que un problema en el sistema de sujeción puede detener la producción de energía o dañar toda la instalación. Especialmente en zonas con fuertes vientos o lluvias intensas, es clave verificar la estabilidad de los soportes y apretar tornillos o elementos de fijación sueltos. Existen soportes fijos ajustables o de seguimiento.

La orientación ideal de los módulos FV es un aspecto clave para mejorar la captación de radiación solar. En general, se recomienda que los paneles estén orientados hacia el sur en el hemisferio norte, permitiendo así un mejor aprovechamiento de la trayectoria solar diaria (De la Cruz Gómez, 2015, p. 41). Sin embargo, en el caso de Colombia, debido a su ubicación geográfica cercana a la línea ecuatorial, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) sugiere que los módulos solares se orienten ligeramente hacia el sur con una inclinación que varía entre 10° y 15°, dependiendo de la latitud y de si se desea priorizar la generación en horas de la mañana o la tarde (UPME, 2020). Esta configuración busca equilibrar la producción energética durante todo el día y adaptarse a las condiciones climáticas y estructurales del sitio.

A continuación, se presenta una tabla con los ángulos sugeridos por la UPME para maximizar la eficiencia de los módulos solares en distintas zonas de Colombia.

Tabla 3 Inclinación sugerida según la latitud en Colombia

Ciudad	Orientación recomendada	Inclinación recomendada (°)
Bogotá	Sur	4
Medellín	Sur	6
Cali	Sur	4
Barranquilla	Sur	10
Bucaramanga	Sur	7
Villavicencio	Sur	4
Pasto	Sur	1
Cúcuta	Sur	8

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Leticia	Sur	0
Manizales	Sur	5

Nota. Adaptado de Guía técnica para la implementación de sistemas solares FV en Colombia (UPME, 2018).

3.7 Gestión de Vegetación y Sombras

Se debe evitar que el crecimiento de plantas, acumulación de hojas o la construcción de infraestructuras cercanas afecten la captación solar de los paneles.

3.8 Implementación de Monitoreo Remoto

La incorporación de sensores y sistemas de telemetría en instalaciones solares puede mejorar significativamente las labores de mantenimiento, ya que permite identificar fallas de manera remota, reduciendo la necesidad de desplazamientos constantes y mejorando la eficiencia operativa del sistema (Nor Azlina Mohd Ghazali & Sujod, 2021).

3.9 Capacitación del Personal Local

La formación de técnicos en las ZNI permitirá reducir tiempos de respuesta y costos de mantenimiento, garantizando mayor autonomía en la operación del sistema.

4. Marco de seguimiento del Mantenimiento de Soluciones Solares Fotovoltaicas en ZNI

4.1. Definición de los Objetivos del Mantenimiento

El mantenimiento de los sistemas solares FV en Zonas No Interconectadas (ZNI) es un proceso fundamental para garantizar la eficiencia, disponibilidad y sostenibilidad de la generación energética. En este contexto, los principales objetivos del mantenimiento son:

- Incrementar la disponibilidad del sistema y reducir los tiempos de inactividad operativa.
- Mejorar el rendimiento energético para garantizar un suministro eléctrico estable y eficiente.
- Disminuir costos operativos a través de estrategias de mantenimiento eficientes y planificadas.
- Asegurar la sostenibilidad del sistema mediante la implementación de buenas prácticas de mantenimiento.
- Prevenir fallas críticas que puedan afectar la vida útil de los componentes y comprometer la operación del sistema.

Estos objetivos servirán como base para el diseño de un plan de mantenimiento que permita mejorar la confiabilidad y la eficiencia de las soluciones solares fotovoltaicas en las ZNI.

4.2. Plan de Mantenimiento

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos del mantenimiento, se requiere la implementación de un plan estructurado que contemple estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo.

4.2.1. Mantenimiento preventivo

Comprende actividades programadas para evitar fallas y maximizar la vida útil de los equipos. Incluye inspecciones periódicas, limpieza de paneles, revisión de conexiones eléctricas, evaluación estructural de soportes y monitoreo del estado de las baterías e inversores.

Se consultaron manuales de los componentes de la solución solar, como de baterías, inversores, reguladores, gestores y paneles solares con el fin de conocer las recomendaciones de uso y de mantenimiento adecuados para contribuir al buen funcionamiento y a mantener la vida útil de cada elemento, los cuales se presentan en el capítulo 1 y se resumen en el Apéndice A.

4.2.2. Mantenimiento correctivo

Se refiere a las acciones ejecutadas para reparar fallas imprevistas o averías en los componentes del sistema. En este aspecto, es fundamental contar con protocolos de intervención rápida y disponibilidad de repuestos críticos.

4.2.3. Frecuencia de mantenimiento

Se establecerán calendarios de revisión y ejecución de tareas según las necesidades del sistema y las recomendaciones de los fabricantes.

El mantenimiento preventivo en instalaciones solares debe realizarse de forma periódica, ajustado a la capacidad del sistema. En el caso de instalaciones con potencias menores a 5 kWp, se recomienda al menos una visita técnica, mientras que, para sistemas de mayor potencia, la frecuencia sugerida es semestral (De la Cruz Gómez, 2015, p. 57).

4.2.4. Asignación de responsabilidades

Se determinarán los roles y funciones de los técnicos y operadores encargados de ejecutar y supervisar las actividades de mantenimiento. Los requisitos de herramientas y dotación para los técnicos se presentan en el Apéndice B.

Un plan de mantenimiento bien estructurado contribuirá a mejorar la operatividad y confiabilidad de los sistemas FV en las ZNI, reduciendo la incidencia de fallas y mejorando el uso de los recursos disponibles.

4.3. Sistema de Seguimiento

El seguimiento del mantenimiento es esencial para evaluar la eficacia de las estrategias implementadas y realizar mejoras continuas en la gestión operativa. Para ello, se propone la adopción de un sistema de monitoreo basado en:

- Plataformas digitales de gestión: implementación de software especializado para la recopilación y análisis de datos operativos donde se refleja el estado de las instalaciones y las intervenciones realizadas.
- Registro de actividades de mantenimiento: Es recomendable implementar bitácoras de mantenimiento en las que se registren de manera sistemática las inspecciones realizadas, los hallazgos identificados, las acciones correctivas y preventivas ejecutadas, así como las fechas de cada intervención. Este tipo de documentación permite llevar un control histórico del estado de la instalación y facilita la planificación de futuras acciones (De la Cruz Gómez, 2015, p. 52).
- Indicadores de desempeño (KPIs):
 - Eficiencia del sistema (%): Comparación de la producción real de energía con la producción teórica máxima esperada.

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Disponibilidad del sistema (%): Tiempo durante el cual el sistema se encuentra en operación en relación con el tiempo total.
- Tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR): Para evaluar la confiabilidad y la capacidad de respuesta ante fallas.

Este sistema de seguimiento permitirá un monitoreo continuo del desempeño del mantenimiento, facilitando la toma de decisiones basada en datos y asegurando la sostenibilidad del sistema fotovoltaico (Trashorras Montecelos, 2021).

4.4. Monitoreo del Rendimiento del Mantenimiento

Para garantizar que el mantenimiento cumple con los estándares de calidad y eficiencia, se requiere un monitoreo constante del rendimiento del sistema. Entre las estrategias recomendadas se incluyen:

- Análisis de datos históricos: Evaluación de tendencias de fallas y eficiencia del sistema para mejorar la planificación del mantenimiento.
- Comparación con normativas internacionales: Uso de estándares como los establecidos por la International Electrotechnical Commission (IEC) y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) para evaluar la efectividad del mantenimiento.
- Mejora continua: Ajuste de las frecuencias y procedimientos de mantenimiento en función de los resultados obtenidos y las condiciones ambientales específicas de cada ZNI.

El monitoreo del mantenimiento permitirá identificar oportunidades de mejora y asegurar la operatividad óptima del sistema fotovoltaico, garantizando un suministro energético confiable y sostenible para las comunidades en ZNI.

5. Propuesta de Indicadores

Se destacan indicadores como la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) como herramientas clave para medir la efectividad del mantenimiento en sistemas solares FV. Estos parámetros permiten evaluar la confiabilidad operativa y la capacidad de respuesta ante incidentes, elementos fundamentales en el diseño de estrategias de mantenimiento eficientes (Nor Azlina Mohd Ghazali & Sujod, 2021).

5.1. Tasa de Fallas

La tasa de fallas es un indicador clave en la gestión del mantenimiento de sistemas solares FV, ya que permite cuantificar la frecuencia con la que ocurren fallos en los distintos componentes del sistema durante un período determinado. Se define como la relación entre el número total de fallas registradas y el tiempo total de operación del sistema o el número de unidades observadas, dependiendo del enfoque de análisis.

$$\text{Tasa de fallas} = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Tiempo de operación o cantidad de sistemas}}$$

Este indicador permite identificar patrones de fallos recurrentes, evaluar la confiabilidad de los componentes (paneles, inversores, baterías, reguladores) y anticipar necesidades de mantenimiento correctivo. En el contexto de las Zonas No Interconectadas (ZNI), donde el acceso a repuestos y soporte técnico puede ser limitado, la medición de la tasa de fallas es esencial para tomar decisiones informadas sobre la planificación de intervenciones y la optimización de recursos.

Además, este indicador facilita la comparación entre diferentes tecnologías, marcas o condiciones operativas, y puede servir de base para ajustar los intervalos de mantenimiento preventivo. Una tasa de fallas elevada puede evidenciar deficiencias en la instalación, condiciones

ambientales adversas o un mantenimiento inadecuado, mientras que una tasa baja sugiere un sistema bien gestionado y confiable.

Para su implementación efectiva, se recomienda mantener registros detallados de todas las incidencias técnicas ocurridas, incluyendo la fecha, tipo de componente afectado, causa probable y acciones correctivas realizadas. Esto permite llevar un control histórico que soporte análisis estadísticos y facilite la mejora continua del sistema.

5.2. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) es un indicador de confiabilidad que representa el tiempo promedio que transcurre entre una falla y la siguiente. Se calcula dividiendo el tiempo total de operación de un sistema por el número de fallas ocurridas en ese mismo periodo:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}}$$

Un valor alto de MTBF indica que las fallas son poco frecuentes y que el sistema es confiable. Este indicador es útil para prever la duración de funcionamiento sin interrupciones y establecer intervalos óptimos de mantenimiento preventivo.

5.3. Tiempo Medio de Reparación (MTTR)

El Tiempo Medio de Reparación (MTTR) mide el tiempo promedio necesario para restaurar un sistema después de una falla. Se calcula como el tiempo total invertido en reparaciones dividido entre el número total de eventos reparados:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de reparaciones}}$$

Este valor ayuda a evaluar la eficiencia del equipo técnico y la logística disponible para las intervenciones. Un MTTR bajo indica una respuesta rápida y efectiva ante fallos.

5.4. Disponibilidad del Sistema

La disponibilidad es un indicador que mide el porcentaje de tiempo durante el cual un sistema está operando de forma correcta respecto al tiempo total de observación. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo total}} \times 100$$

Una alta disponibilidad refleja una buena planificación del mantenimiento y una operación eficiente, aspectos críticos en sistemas aislados como los de las ZNI.

5.5. Eficiencia del Sistema

La eficiencia del sistema fotovoltaico se refiere a la capacidad del sistema para convertir la radiación solar disponible en energía eléctrica útil. Se calcula mediante:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía teórica máxima esperada}} \times 100$$

Este indicador permite evaluar el rendimiento global del sistema teniendo en cuenta factores como limpieza, orientación de paneles, degradación de componentes y condiciones ambientales. Una eficiencia adecuada garantiza el aprovechamiento óptimo de los recursos solares disponibles.

6. Propuesta para la Mejora continua en los Procesos de Mantenimiento

La energía solar es uno de los recursos naturales más utilizados actualmente en zonas no interconectadas (ZNI) gracias a su disponibilidad y sostenibilidad. No obstante, para maximizar su rendimiento, es fundamental mantener una temperatura adecuada y una superficie libre de polvo en los paneles solares. Diversos estudios han demostrado que el sobrecalentamiento y la acumulación de suciedad pueden reducir significativamente la eficiencia de conversión de los módulos FV (Jaiganesh et al., 2021).

Una propuesta innovadora para la mejora continua en los procesos de mantenimiento es la implementación de un sistema automatizado de limpieza y enfriamiento. Esta solución técnica se basa en el uso de sensores estratégicamente ubicados que permiten monitorear en tiempo real el estado de los paneles:

- Sensor de temperatura: detecta cuando la superficie del panel excede el umbral térmico definido.
- Sensor LDR (Light Dependent Resistor): identifica la presencia de polvo o suciedad.
- Sensor de corriente: analiza las características VI (voltaje-corriente) para detectar desviaciones.

Cuando se detectan condiciones adversas, el sistema activa una bomba que pulveriza agua a alta presión sobre los paneles, logrando simultáneamente enfriar su temperatura y eliminar los residuos acumulados. Este mecanismo contribuye a mejorar la eficiencia energética, reducir la frecuencia de fallas por sobrecalentamiento y extender la vida útil de los módulos (Priyadharshini, Gomathy & Elakiya, 2021).

Los sistemas de enfriamiento activo con limpieza automática han demostrado mejorar la eficiencia de conversión hasta en un 25 % y reducir la tasa de fallas en sistemas instalados en

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

climas cálidos y polvorientos (Jaiganesh et al., 2021). Esta evidencia fortalece el argumento a favor de su implementación como parte de estrategias de mantenimiento avanzado.

Además, esta propuesta puede complementarse mediante la incorporación de tecnologías IoT que permitan centralizar y visualizar los datos recolectados por los sensores. Así, se facilita la detección remota de fallas y se mejora la programación del mantenimiento predictivo (Ghazali & Sujod, 2021).

Estudios comparativos también refuerzan la efectividad de esta tecnología. Por ejemplo, Priyadharshini et al. (2022) concluyen que los sistemas automatizados con control de temperatura y limpieza superan de forma constante a los métodos manuales o pasivos, particularmente en ambientes con alta carga de polvo en el aire.

7. Conclusiones

Se logró identificar y estructurar los requisitos críticos de mantenimiento que garantizan el funcionamiento óptimo de las soluciones solares fotovoltaicas en Zonas No Interconectadas (ZNI). Entre estos, destacan la limpieza periódica de los módulos, la inspección visual de estructuras, conexiones y cableado, el monitoreo del rendimiento eléctrico y la revisión de componentes esenciales como baterías, inversores y reguladores. Estos procedimientos permiten prevenir fallas, mejorar la eficiencia del sistema y extender su vida útil, contribuyendo así a la sostenibilidad energética en comunidades apartadas.

Se diseñó un marco de seguimiento aplicable por CENS como operador de red, estructurado a partir de formatos de inspección visual, protocolos de revisión periódica y procedimientos de recolección de datos técnicos. Este marco estandariza las actividades de mantenimiento, promueve la trazabilidad operativa y permite organizar las labores de forma sistemática, facilitando la planificación, ejecución y verificación de las tareas en campo.

Se definieron indicadores de desempeño técnico clave como la disponibilidad del sistema, la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la eficiencia energética. Estos indicadores permiten cuantificar el estado operativo de los sistemas solares, detectar desviaciones y tomar decisiones orientadas a la mejora continua. Su integración en los procesos de mantenimiento fortalece la gestión basada en datos y permite anticiparse a fallas potenciales.

Se formularon propuestas de mejora fundamentadas en literatura científica y experiencias de campo, tales como la implementación de tecnologías IoT para monitoreo remoto, la automatización de sistemas de limpieza y enfriamiento, y el fortalecimiento de las capacidades técnicas locales. Estas estrategias permiten mejorar el mantenimiento preventivo, reducir costos

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

operativos, incrementar la confiabilidad de los sistemas e incrementar la autonomía energética de las comunidades beneficiarias.

8. Recomendaciones

1. Fomentar el enfoque de economía circular en los sistemas FV: se recomienda adoptar principios de economía circular en el diseño, operación y disposición final de los sistemas solares FV, especialmente en zonas no interconectadas. Investigaciones recientes proyectan que en las próximas décadas los residuos generados por los paneles solares podrían superar el volumen de nuevas instalaciones, lo que elevaría significativamente el costo nivelado de la energía y afectaría la competitividad del sector (Duran, Atasu & Van Wassenhove, 2021). Por ello, es esencial priorizar estrategias como el reciclaje, la reutilización de componentes y el diseño modular.

2. Implementar sistemas de seguimiento solar (tracking): para maximizar la eficiencia energética de los sistemas solares, especialmente en zonas con alta radiación, se recomienda el uso de tecnologías de seguimiento solar. Estas permiten orientar automáticamente los módulos para que se mantengan perpendiculares a los rayos solares a lo largo del día, desde el este hacia el oeste, lo que aumenta significativamente la captación de energía (De la Cruz Gómez, 2015, p. 42). Esta tecnología resulta especialmente útil en instalaciones robustas o de gran escala dentro de las ZNI.

3. Promover la investigación aplicada en mantenimiento y reciclaje: se sugiere incentivar proyectos de investigación enfocados en mejorar las técnicas de mantenimiento predictivo, la vida útil de los componentes, y el tratamiento de residuos derivados de los sistemas solares. Esto permitirá no solo fortalecer el conocimiento técnico local, sino también generar soluciones adaptadas al contexto rural y no interconectado del país.

4. Se recomienda implementar un ciclo de mejora continua bajo la metodología PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar), adaptado al entorno de las ZNI. Este enfoque permitirá retroalimentar las acciones de mantenimiento con los datos recopilados, facilitando la actualización constante de estrategias y recursos. Asimismo, es esencial incentivar la cultura del

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

mantenimiento preventivo mediante campañas educativas locales, el fortalecimiento del acompañamiento institucional y la inclusión de indicadores de desempeño en la evaluación de proyectos energéticos sostenibles.

Referencias Bibliográficas

- Abdelsattar, M., AbdelMoety, A., & Emad Eldeen, A. (2025). Advanced machine learning techniques for predicting power generation and fault detection in solar photovoltaic systems. *Neural Computing and Applications*, 37, 8825–8844. <https://doi.org/10.1007/s00521-025-11035-6>
- Beijing Epsolar Technology Co., Ltd. (s.f.). Manual del usuario: Controlador de carga solar MPPT serie XTRA N (Modelos XTRA1206N a XTRA4415N), versión 1.3. <https://www.epever.com>
- Comparative study of bifacial versus monofacial PV systems at the global scale. (2023). *Clean Energy*, 8(4), 248–258. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad028>
- De la Cruz Gómez, J. M., De la Cruz Gómez, F., & Úbeda Ormeño, R. (2009). *Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas (1.ª ed.)*. Barcelona: Ediciones Experiencia, S.L.
- Serasu Duran, A. A. (2021). Cleaning after Solar Panels: A Circular Outlook. *International Journal of Production Research*, 211-230. doi:10.1080/00207543.2021.1990434
- Engenius. (2021). Ficha técnica: Gestor para monitoreo de disponibilidad de energía (Versión 2). <https://www.engenius.com.co>

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

Ghazali, S. N., Sujod, M. Z., & Jadin, M. S. (2021). Forensic of Solar PV: A Review of Potential Faults and Maintenance Strategies.

<https://doi.org/10.1109/iceet53442.2021.9659624>

Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2020). Solar cell efficiency tables (version 56). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(7), 629-638.

<https://doi.org/10.1002/pip.3303>

Guerrero Pérez, R. (2016, junio). Replanteo y funcionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas. IC Editorial. <https://www.iceditorial.com>

Huizhou EPEVER Technology Co., Ltd. (s.f.). Manual del inversor de onda sinusoidal pura: IPower series (Modelos IP350–IP2000) [Manual del usuario, versión V2.1].

<https://www.epever.com>

IEEE. (2022). Forensic of Solar PV: A Review of Potential Faults and Maintenance Strategies. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 58(6), 5872–5881.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3185417>

IRENA. (2021). Renewable energy statistics 2021. International Renewable Energy Agency.

<https://www.irena.org/publications/2021>

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

International Electrotechnical Commission. (2019). IEC 61724-1: Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. IEC.

Jaiganesh, K., Reddy, K. B., Shobhitha, B. K., & Goud, B. D. (2021). Enhancing the efficiency of rooftop solar photovoltaic panel with simple cleaning mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 411-415. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.565>

Jinko Solar Co., Ltd. (2020). Ficha técnica: Módulo Tiger Pro 54HC 395–415W. Recuperado de <https://www.jinkosolar.com>

LONGi. (2024). Operation and Maintenance Manual (Versión 2.0). LONGi Green Energy Technology Co., Ltd. Recuperado de https://static.longi.com/LON_Gi_Maintenance_Manual_V2_0_EN_43815b2263.pdf

Miraftabzadeh, S. M., Yousefi, H., Rezaei, M. M., & Sadeghi, B. (2025). Data anomaly detection in photovoltaic power time-series: A deep neural network autoencoder approach. *Applied Energy*, 360, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122045>

Nor Azlina Mohd Ghazali, S., & Sujod, M. Z. (2021, octubre). Forensic of solar PV: A review of potential faults and maintenance strategies. En 2021 7th International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iceet53442.2021.9659624>

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

P. A. Patil, J. S. Bagi and M. M. Wagh, "A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel," 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India, 2017, pp. 250-256, <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389895>

Packard, C. E., Wohlgemuth, J. H., & Kurtz, S. R. (2012). Development of a Visual Inspection Checklist for Evaluation of Fielded PV Module Condition (NREL/PR-5200-56154). National Renewable Energy Laboratory (NREL). Recuperado de https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc829553/m2/1/high_res_d/1039082.pdf

Patel, P. (2022, diciembre 21). Paper-Thin Solar Makes Any Surface Photovoltaic. IEEE Spectrum (sección Energy).

Priyadarshini, N., Gomathy, S., & Elakiya, V. (2021). A Review on Solar Panel Monitoring and Enhancing the Performance by Temperature and Dust Maintenance. En Innovation in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). IEEE. <https://doi.org/10.1109/i-PACT52855>.

Priyadarshini, R., Gomathy, S., & Elakiya, P. (2021). Enhancing Solar Panel Performance Using Active Cooling and Cleaning System. International Journal of Engineering Research & Technology, 10(4), 250–254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115611>

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

- Rana, Z., Zamora, P. P., Soliz, A., Soler, D., Reyes Cruz, V. E., Cobos Murcia, J. A., & Galleguillos Madrid, F. M. (2025). Solar Panel Corrosion: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(13), 5960. <https://doi.org/10.3390/ijms26135960>
- Reinders, A., Verlinden, P., van Sark, W., & Freundlich, A. (2018). *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*. Wiley-VCH.
- Sunrun. (s.f.). How to clean solar panels. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de <https://www.sunrun.com/go-solar-center/solar-articles/how-to-clean-solar-panels>
- Torres-Pacheco, S., Jurado-Pérez, F., Granados-Lieberman, D., & Lozano-Luna, A. E. (2018). Eficiencia en paneles solares. *Revista del Diseño Innovativo*, 2(2), 9-21. Recuperado de https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf
- Trashorras Montecelos, J. (2021). *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas (UF0150)*. Paraninfo. ISBN 978-84-1366-033-2.
- Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2020). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/simco/RadiacionSolar>

GUIA PARA EL MANTENIMIENTO DE SOLUCIONES SOLARES EN ZNI

U.S. Department of Energy. (s.f.). Perovskite Solar Cells. Recuperado de <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>

UU Energy. (2021). Manual UU 24V-150Ah LiFePO₄ Battery Pack. UU Energy.

Villalba, M., & Bazán, P. (2020). Mantenimiento de sistemas fotovoltaicos: Conceptos básicos y técnicas para la operación eficiente. Universidad Politécnica de Madrid.

Wang, R., Mujahid, M., Duan, Y., Wang, Z. K., Xue, J., & Yang, Y. (2019). A review of perovskite solar cell stability. *Advanced Functional Materials*, 29(47), 1808843. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808843>

Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 891–959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012>

Apéndices

Apéndice A. Formato de revisión y acción para el mantenimiento de sistemas solares FV en ZNI.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/10trGJ2Enur2Q8V2-k0F_ckhv-zOgXSaY/edit?usp=sharing&ouid=101150784452707416828&rtpof=true&sd=true

Apéndice B. Requisitos técnicos y procedimiento para la revisión tipo de sistemas solares FV.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ToJyrQyziyHp62_6-kPMIPBAnZ9EDMBn/edit?usp=sharing&ouid=101150784452707416828&rtpof=true&sd=true

Nota. Los apéndices A y B están disponibles como archivos complementarios en formato Excel (.xlsx) y hacen parte integral de esta guía.