



Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Automotriz

INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autor: José Antonio Riascos Herrera

Tutor: Ing. Fernando Gómez Berrezueta

**Mantenimiento de un Sistema de Árbol Eléctrico con
Paneles Solares Monocristalinos y Policristalinos
utilizando el Solar Panel Tester WS400A**

Certificado de Autoría

Yo, José Antonio Riascos Herrera, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada. Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

José Antonio Riascos Herrera

C.I.: 0919486126

Aprobación del Tutor

Yo, Fernando Gómez Berrezueta certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Ing. Fernando Gómez Berrezueta, M.Sc.

C.I.: 0103441846

Director de Proyecto

Dedicatoria

A todos aquellos que iluminaron mi camino,

que me inspiraron a crecer y a superarme.

A quienes me brindaron su apoyo incondicional,

y a los que me desafiaron a dar lo mejor de mí.

A las experiencias que me formaron,

y a los obstáculos que me fortalecieron.

Este proyecto es el fruto de un viaje compartido,

un testimonio de perseverancia y pasión.

Dedico este logro a la búsqueda incesante del conocimiento,

y al poder transformador de la educación.

José Riascos

Agradecimiento

Al culminar este proyecto, expreso mi sincero agradecimiento por el apoyo recibido durante este enriquecedor proceso de aprendizaje y crecimiento académico.

Valoro profundamente la oportunidad de haber formado parte de un entorno que fomenta el pensamiento crítico y la búsqueda constante del conocimiento. Los recursos y experiencias compartidos han sido fundamentales en este camino.

Reconozco con aprecio la importancia del rigor y la dedicación que han guiado este trabajo. Este proyecto no solo representa un logro personal, sino también el resultado de un esfuerzo colectivo y un ambiente propicio para el desarrollo intelectual.

Agradezco a quienes, de diversas maneras, han contribuido a elevar la calidad de este estudio. Su compromiso con la excelencia ha sido una verdadera fuente de inspiración.

Este trabajo marca el cierre de una etapa significativa, y espero que sirva como base para futuros desafíos y oportunidades en el mundo del conocimiento y la innovación.

José Riascos

Índice General

Certificado de Autoría	iii
Aprobación del Tutor	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice General	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
Capítulo I.....	1
Antecedentes	1
1.1 Tema de Investigación.....	1
1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema	1
1.2.1 Planteamiento de Problema	1
1.2.2 Formulación del Problema	2
1.2.3 Sistematización del Problema	2
1.3 Objetivos de la Investigación	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación y Delimitación de la Investigación.....	4
1.4.1 Justificación Teórica.....	6
1.4.2 Justificación Metodológica	7
1.4.3 Justificación Práctica.....	9
1.4.4 Delimitación Temporal.....	10

1.4.5	Delimitación Geográfica	10
1.4.6	Delimitación de Contenido.....	10
	Capítulo II	13
	Marco Referencial	13
2.1	Marco Teórico	13
2.1.1	Teoría de la conversión fotovoltaica	14
2.1.2	Eficiencia energética en sistemas solares	15
2.1.3	Teoría de la degradación de paneles solares.....	17
2.1.4	Pérdidas por suciedad (soiling losses).....	18
2.1.5	Principios de sostenibilidad energética	19
2.2	Marco Conceptual	21
2.2.1	Paneles solares monocristalinos	21
2.2.2	Mantenimiento preventivo en sistemas solares	21
2.2.3	Instrumentación especializada: Solar Panel Tester WS400A.....	22
2.2.4	Diseño experimental antes-después	23
2.2.5	Árbol eléctrico solar	24
2.2.6	Eficiencia y rendimiento en sistemas solares urbanos	24
	Capítulo III	26
	Impacto del Mantenimiento en el Rendimiento de Paneles Solares Monocristalinos	26
3.1	Sistemas de Árbol Eléctrico con Paneles Solares	26
3.2	Eficiencia y Rendimiento de Paneles Solares	26
3.3	Mantenimiento Preventivo de Sistemas Solares	27
3.4	Técnicas de Descontaminación para Paneles Solares	28
3.5	Metodología Aplicada	29
3.5.1	Métodos.....	29

3.5.2	Tipo de Estudio	30
3.5.3	Investigación Exploratoria	30
3.5.4	Investigación de Campo	31
3.5.5	Investigación Aplicada	31
3.6	Proceso de Evaluación del Rendimiento de los Paneles Solares	32
3.6.1	Selección del Sistema de Árbol Eléctrico	32
3.6.2	Instrumentación y Equipos Utilizados	32
3.6.3	Procedimiento de Medición	34
3.6.4	Recopilación y Registro de Datos	36
Capítulo IV		38
Análisis.....		38
4.1	Descripción.....	38
4.2	Procedimiento de medición con el Solar Panel Tester WS400A	38
4.2.1	Preparación del Equipo	38
4.2.2	Conexión del Panel Solar	39
4.2.3	Realización de las Mediciones	39
4.2.4	Repetición del Proceso	39
4.2.5	Finalización de las Mediciones	39
4.3	Resultado de las pruebas	40
4.4	Análisis de los Resultados.....	40
4.4.1	Análisis de los Paneles Policristalinos de 150 W	40
4.4.2	Análisis de los Paneles Monocristalinos de 300 W.....	41
4.4.3	Evaluación Global de las Mejoras.....	42
Conclusiones		43
Recomendaciones.....		44

Bibliografia.....	45
-------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1 Revisión del equipo	38
Figura 2 Conexión al panel	39

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Resultados antes del mantenimiento</i>	40
Tabla 2 <i>Resultados después del mantenimiento</i>	40

Resumen

Este proyecto evalúa el impacto del mantenimiento preventivo, específicamente la descontaminación, en el rendimiento de un sistema de paneles solares en un entorno urbano. Se utilizaron paneles solares policristalinos de 150 W y monocristalinos de 300 W para estudiar cómo la limpieza afecta su eficiencia. El sistema de árbol eléctrico combina generación de energía y estética urbana, representando una solución innovadora para las ciudades.

El proceso de evaluación incluyó mediciones antes y después del mantenimiento, utilizando el Solar Panel Tester WS400A para registrar voltaje, corriente y potencia. Las mediciones iniciales revelaron una reducción en la eficiencia debido a la acumulación de suciedad. Se aplicó un proceso de descontaminación con una solución de limpieza biodegradable, eliminando residuos sin dañar los paneles.

Los resultados mostraron mejoras significativas tras la limpieza. Los paneles policristalinos incrementaron su potencia generada entre el 12% y el 13%, y los monocristalinos, alrededor del 7%. Estas mejoras reflejan una restauración hacia condiciones óptimas, destacando la importancia de la limpieza regular para maximizar la eficiencia y estabilidad del sistema.

El proyecto subraya la necesidad de integrar el mantenimiento preventivo en la gestión de sistemas solares. La descontaminación no solo prolonga la vida útil de los paneles, sino que también optimiza la producción de energía. Además, resalta la importancia del diseño adecuado y la orientación de los paneles para mejorar la captación de luz solar y reducir el sombreado.

En conclusión, el mantenimiento preventivo es crucial para optimizar el rendimiento de los paneles solares, asegurando que cumplan con sus objetivos de sostenibilidad energética. Los resultados de este estudio ofrecen un marco para mejorar la eficiencia de las instalaciones solares, apoyando el desarrollo de ciudades más sostenibles y eficientes.

Abstract

This project evaluates the impact of preventive maintenance, specifically cleaning, on the performance of a solar panel system in an urban environment. Polycrystalline 150 W and monocrystalline 300 W solar panels were used to study how cleaning affects their efficiency. The solar tree system combines energy generation with urban aesthetics, representing an innovative solution for cities.

The evaluation process included measurements before and after maintenance, using the Solar Panel Tester WS400A to record voltage, current, and power. Initial measurements revealed reduced efficiency due to dirt accumulation. A cleaning process with a biodegradable solution was applied, removing debris without damaging the panels.

The results showed significant improvements after cleaning. Polycrystalline panels increased their power output by 12% to 13%, and monocrystalline panels by about 7%. These improvements reflect a restoration to optimal conditions, highlighting the importance of regular cleaning to maximize system efficiency and stability.

The project emphasizes the need to integrate preventive maintenance into the management of solar systems. Cleaning not only extends the lifespan of the panels but also optimizes energy production. It also highlights the importance of proper design and orientation of the panels to enhance light capture and reduce shading.

In conclusion, preventive maintenance is crucial to optimize the performance of solar panels, ensuring they meet their goals of energy sustainability. The results of this study provide a framework for improving the efficiency of solar installations, supporting the development of more sustainable and efficient cities.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Tema de Investigación

Mantenimiento de un Sistema de Árbol Eléctrico con Paneles Solares Mixtos utilizando el Solar Panel Tester WS400A

1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

1.2.1 Planteamiento de Problema

En el contexto actual de la búsqueda de eficiencia energética y sostenibilidad, los sistemas de energía solar, particularmente los árboles eléctricos con paneles solares mixtos que combinan tecnología monocristalina y policristalina, se han convertido en una solución innovadora para la generación de energía limpia. Estos sistemas no solo proporcionan una fuente de energía renovable, sino que también ofrecen una alternativa estéticamente agradable y funcional para espacios urbanos y rurales. Sin embargo, para garantizar su óptimo rendimiento y longevidad, el mantenimiento adecuado de estos sistemas es crucial.

El mantenimiento preventivo, especialmente la descontaminación de los paneles solares, juega un papel fundamental en la eficiencia de estos sistemas. La acumulación de polvo y contaminantes en los paneles solares puede reducir su eficiencia significativamente. Un estudio indicó una reducción del 32% en el rendimiento debido a la acumulación de polvo en un periodo de ocho meses (Sulaiman et al., 2014). Esto subraya la importancia de un mantenimiento regular y efectivo.

En este contexto, el Solar Panel Tester WS400A emerge como una herramienta valiosa para el mantenimiento de estos sistemas. Este dispositivo permite medir voltaje, corriente y potencia hasta 400W en paneles solares, proporcionando datos sobre el rendimiento de los paneles antes y después de las intervenciones de mantenimiento.

Existe una necesidad de investigar y cuantificar cómo los protocolos de mantenimiento preventivo, particularmente la descontaminación, afectan el rendimiento de los paneles solares. Una de las recomendaciones efectivas para mitigar el impacto de la acumulación de polvo ha sido la limpieza periódica de los colectores solares (Mani & Pillai, 2010). La implementación de un protocolo efectivo de mantenimiento, evaluado con herramientas como el WS400A, podría tener un impacto significativo en la eficiencia y longevidad de estos sistemas.

El presente proyecto busca abordar esta necesidad, centrándose en un sistema específico de árbol eléctrico equipado con dos paneles solares monocristalinos de 300W y dos paneles policristalinos de 150W. La investigación se enfoca en determinar cómo la implementación de un protocolo de mantenimiento preventivo, utilizando el WS400A para evaluar el impacto de la descontaminación, afecta el rendimiento de los paneles solares en este tipo particular de sistema.

La relevancia de este estudio radica en su potencial para optimizar el rendimiento y la vida útil de los sistemas de árbol eléctrico con paneles solares monocristalinos, contribuyendo así a la eficiencia energética y la sostenibilidad en entornos urbanos y rurales.

1.2.2 Formulación del Problema

¿Cómo puede el Solar Panel Tester WS400A optimizar el mantenimiento de los sistemas de árbol eléctrico con paneles solares mixtos (monocristalinos y policristalinos), para maximizar su eficiencia y durabilidad en beneficio del suministro energético sostenible?

1.2.3 Sistematización del Problema

¿Cómo se puede utilizar el Tester WS400A para evaluar de manera efectiva el estado de los dos paneles solares monocristalinos de 300W y los dos paneles policristalinos de 150W antes y después del mantenimiento preventivo de descontaminación?

¿Cuál es el impacto diferencial del mantenimiento preventivo de descontaminación en el rendimiento de los paneles solares monocristalinos y policristalinos según las mediciones del Tester WS400A?

¿Qué protocolo de mantenimiento preventivo de descontaminación y medición es el más adecuado para optimizar el funcionamiento de un sistema mixto de paneles solares monocristalinos y policristalinos en el sistema de árbol eléctrico?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Determinar el impacto del mantenimiento en el rendimiento de un sistema mixto de paneles solares, compuesto por dos paneles monocristalinos de 300W y dos paneles policristalinos de 150W, mediante la comparación de mediciones de potencia máxima, corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto antes y después de aplicar un protocolo de mantenimiento estandarizado, utilizando el Solar Panel Tester WS400A.

1.3.2 Objetivos Específicos

Evaluar el estado de los dos paneles solares monocristalinos de 300W y los dos paneles policristalinos de 150W utilizando el Tester WS400A antes y después del mantenimiento preventivo de descontaminación, detectando cambios en el rendimiento del sistema.

Implementar y analizar la efectividad de un protocolo de mantenimiento preventivo de descontaminación, basado en los resultados obtenidos con el Tester WS400A, comparando su impacto en los paneles monocristalinos y policristalinos.

Elaborar una guía práctica para el manejo del Tester WS400A y la ejecución de protocolos de mantenimiento preventivo de descontaminación y medición específicos para sistemas mixtos de paneles solares monocristalinos y policristalinos en sistemas de árbol eléctrico.

1.4 Justificación y Delimitación de la Investigación

El presente estudio se fundamenta en la necesidad crítica de evaluar cuantitativamente el impacto del mantenimiento preventivo en sistemas de energía solar, específicamente en árboles eléctricos con paneles solares monocristalinos. La relevancia de esta investigación se justifica por diversas razones que subrayan su importancia tanto desde una perspectiva técnica como práctica.

Primero, la precisión en la medición de parámetros eléctricos es fundamental para garantizar que las intervenciones de mantenimiento logren mejorar efectivamente el rendimiento de los sistemas solares. El uso del Solar Panel Tester WS400A se destaca por su capacidad para proporcionar mediciones detalladas de voltaje, corriente y potencia hasta 400W. Estos instrumentos especializados son cruciales para recopilar datos confiables y precisos, lo que es esencial para la investigación científica en energía solar. Como señalan Najmi & Rachid, (2023), "numerosos estudios han demostrado que la acumulación de polvo en las superficies solares puede causar una degradación significativa en su eficiencia de conversión solar". Esto destaca la necesidad de herramientas precisas para evaluar la eficacia de las prácticas de limpieza y mantenimiento.

En segundo lugar, el enfoque en el mantenimiento preventivo, especialmente la descontaminación, es vital dado que la suciedad acumulada en los paneles solares puede reducir su eficiencia de manera considerable. Nezamisavojbolaghi et al. (2023) observa que "las pérdidas por suciedad en los paneles solares son una preocupación significativa y pueden ser mitigadas con prácticas de mantenimiento adecuadas". La implementación de un protocolo regular de limpieza no solo ayuda a mantener la eficiencia de los paneles, sino que también extiende su vida útil, asegurando así un rendimiento óptimo a largo plazo. Este enfoque permite cuantificar el impacto directo de las prácticas de mantenimiento en la mejora del rendimiento

del sistema, lo cual es fundamental para operadores que buscan maximizar la eficiencia de sus instalaciones.

Además, el método comparativo utilizado al medir el rendimiento de los paneles solares antes y después del mantenimiento ofrece una base clara para la comparación. Este enfoque metodológico es ampliamente aceptado en estudios de eficiencia energética, ya que permite una evaluación objetiva y directa de las intervenciones de mantenimiento. Kazem et al. (2020) enfatizan que "la comparación directa del rendimiento antes y después del mantenimiento proporciona una medida clara y cuantificable del impacto de la intervención". Este tipo de análisis es invaluable para determinar la efectividad real de los procedimientos de limpieza implementados y para ajustar las estrategias de mantenimiento según sea necesario.

La relevancia práctica de este estudio es evidente, dado que responde a una necesidad real y apremiante en el campo de la energía solar. El mantenimiento regular puede mejorar el rendimiento anual de los sistemas solares de manera significativa. Este estudio no solo busca cuantificar dicho impacto, sino que también pretende proporcionar información práctica y aplicable que pueda ser utilizada por operadores de sistemas solares para optimizar sus prácticas de mantenimiento. Como resultado, se espera que los hallazgos de esta investigación contribuyan a aumentar la eficiencia energética y la sostenibilidad en entornos que dependen de la energía solar.

Por último, la replicabilidad del protocolo de mantenimiento y medición propuesto añade un valor significativo al estudio. Este protocolo puede ser fácilmente adaptado e implementado en otros sistemas solares similares, aumentando así su aplicabilidad y relevancia en diversos contextos. La capacidad de replicar el protocolo asegura que los beneficios de esta investigación se puedan extender a otros operadores de energía solar, lo que podría conducir a mejoras generalizadas en la eficiencia del sistema.

1.4.1 Justificación Teórica

Este estudio se basa en varias teorías y conceptos fundamentales que son cruciales para entender y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos. Estas teorías ofrecen un marco conceptual sólido que vincula la investigación práctica con desarrollos teóricos en el campo de la energía solar.

La conversión fotovoltaica es un proceso que aprovecha el efecto fotoeléctrico, donde los fotones de la luz solar excitan los electrones en un material semiconductor, como el silicio, generando una corriente eléctrica. Este fenómeno es la base de las celdas solares, que capturan la energía solar y la convierten en electricidad. Bauer (2015) destaca cómo este proceso es afectado por condiciones externas, como la contaminación ambiental, que puede disminuir la eficiencia de las celdas solares al bloquear o dispersar la luz incidente.

La eficiencia de los sistemas solares se mide por la capacidad de convertir la energía solar recibida en energía eléctrica útil. Según Green y Bremner (2015), la eficiencia está limitada por factores teóricos, como el análisis de Shockley-Queisser, pero puede ser mejorada mediante el uso de tecnologías avanzadas, como las celdas de multijunción que utilizan múltiples capas de materiales semiconductores. Estas celdas son capaces de capturar un espectro más amplio de luz solar, lo que incrementa significativamente su eficiencia teórica.

Sin embargo, los paneles solares enfrentan un proceso de degradación natural que afecta su rendimiento a lo largo del tiempo. Este proceso puede acelerarse debido a la acumulación de suciedad y otros contaminantes en la superficie del panel. Gong et al. (2019) explican que la implementación de un mantenimiento preventivo regular es crucial para mitigar estas pérdidas y prolongar la vida útil de los paneles solares. Este mantenimiento incluye la limpieza y revisión periódica para asegurar que los paneles funcionen a su máxima capacidad.

Las pérdidas por suciedad, conocidas como "soiling losses", son un problema cuantificable que puede reducir significativamente la producción de energía. La acumulación

de polvo y otros materiales en los paneles solares impide que la luz solar llegue efectivamente al semiconductor, reduciendo la generación de electricidad. Este fenómeno es un tema de estudio importante para entender mejor las formas de maximizar la producción de energía a través de estrategias de limpieza y mantenimiento (Gong et al., 2019).

El mantenimiento preventivo no solo ayuda a mantener la eficiencia de los paneles solares, sino que también es fundamental para la sostenibilidad energética a largo plazo. Crabtree y Lewis (2007) enfatizan que mejorar la eficiencia de conversión y asegurar el funcionamiento óptimo de los sistemas solares es esencial para que la energía solar sea competitiva con los combustibles fósiles. Esto requiere un enfoque integrado que incluya la planificación de intervenciones regulares y el uso de tecnologías avanzadas para el monitoreo y mantenimiento.

La sostenibilidad energética no solo se refiere a la producción eficiente de energía, sino también al uso responsable que respalde el desarrollo humano en dimensiones sociales, económicas y ambientales. Green y Bremner (2015) subrayan la importancia de desarrollar tecnologías que no solo sean eficientes sino también accesibles y aplicables a gran escala, para maximizar el impacto positivo de la energía solar en el mundo.

Finalmente, la teoría de sistemas aplicada a la energía solar destaca que los componentes de un sistema interactúan entre sí y con su entorno. El rendimiento global de un sistema de energía solar es el resultado de estas interacciones complejas, y el mantenimiento adecuado es crucial para optimizar estas interacciones y asegurar un rendimiento eficiente y sostenible del sistema de árbol eléctrico con paneles solares.

1.4.2 Justificación Metodológica

El mantenimiento adecuado de los paneles solares es esencial para maximizar su eficiencia energética y prolongar su vida útil. La acumulación de polvo, hojas, excrementos de aves y otros residuos puede reducir significativamente la eficiencia de conversión de energía

de los paneles solares. Estudios han demostrado que la eficiencia de los paneles puede disminuir entre un 30% y un 40% debido a la acumulación de polvo, con pérdidas en la producción de energía de hasta un 86% en casos extremos (Najmi & Rachid, 2023). Por lo tanto, es crucial realizar limpiezas regulares para mantener la producción óptima de energía.

Existen diversas técnicas para la limpieza de paneles solares, que van desde métodos manuales hasta soluciones automatizadas. La limpieza manual generalmente requiere la intervención de profesionales capacitados, lo cual puede resultar costoso debido al uso de agua y mano de obra (Najmi & Rachid, 2023). Sin embargo, los sistemas automatizados, como los robots de limpieza, ofrecen una alternativa eficiente al minimizar la necesidad de intervención humana y permiten una limpieza más uniforme y constante, especialmente en instalaciones de gran escala (Najmi & Rachid, 2023).

El uso de tecnologías avanzadas de monitoreo es esencial para identificar y corregir problemas en los sistemas fotovoltaicos antes de que se conviertan en fallas significativas. Métodos como las redes neuronales artificiales y el aprendizaje automático se están implementando para mejorar la detección de fallas y optimizar el rendimiento del sistema (Chan & Calleja, 2006).

Las condiciones ambientales y geográficas juegan un papel crucial en la planificación del mantenimiento. En regiones áridas y desérticas, los paneles son más propensos a acumular polvo, mientras que en zonas costeras, los depósitos de sal pueden acelerar la corrosión de los materiales. Es necesario adaptar las prácticas de mantenimiento a las condiciones específicas de cada ubicación para asegurar la eficiencia del sistema (Najmi & Rachid, 2023).

El mantenimiento adecuado no solo mejora la eficiencia energética, sino que también ofrece beneficios económicos al reducir los costos de operación y prolongar la vida útil de los paneles. Además, un sistema bien mantenido contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ al optimizar la conversión de energía solar en electricidad (Najmi & Rachid, 2023).

1.4.3 Justificación Práctica

El mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos es fundamental para maximizar su eficiencia y prolongar su vida útil, aspectos que son esenciales en el contexto de la creciente adopción de energías renovables. La acumulación de polvo, residuos y otros elementos sobre los paneles solares puede impactar negativamente su eficiencia de conversión energética. Diversos estudios han demostrado que esta acumulación puede reducir la eficiencia de los paneles solares hasta en un 40%, lo que puede resultar en una disminución en la producción de energía de hasta un 86% en situaciones extremas (Najmi & Rachid, 2023). Esto subraya la necesidad de implementar prácticas de limpieza y mantenimiento regulares para asegurar un rendimiento óptimo y continuo.

Las estrategias de operación y mantenimiento (O&M) de los sistemas solares son vitales para su funcionamiento efectivo y sostenible. Estas estrategias incluyen el monitoreo continuo, que permite detectar desviaciones en el rendimiento del sistema y tomar acciones correctivas antes de que se produzcan fallas significativas. El mantenimiento predictivo es igualmente importante, ya que utiliza datos históricos y modelos de simulación para prever problemas potenciales, lo que permite optimizar las rutinas de mantenimiento y reducir los costos operativos (Hernández-Callejo et al., 2019; Keisang et al., 2023).

Además, el mantenimiento correctivo es crucial cuando se identifican fallas que requieren atención inmediata para evitar interrupciones prolongadas en la generación de energía. La implementación de tecnologías avanzadas, como los sistemas automatizados y las técnicas basadas en inteligencia artificial, mejora significativamente la precisión y efectividad del monitoreo y la gestión del sistema (Keisang et al., 2023). Estas innovaciones no solo mejoran el rendimiento de los paneles solares, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad de las instalaciones solares al reducir el tiempo de inactividad y las reparaciones de emergencia.

Desde una perspectiva económica, el mantenimiento adecuado de los paneles solares tiene múltiples beneficios. No solo optimiza la producción de energía, sino que también prolonga la vida útil del sistema, reduciendo así los costos operativos y mejorando la rentabilidad general de las instalaciones solares. Se estima que un mantenimiento regular puede mejorar el rendimiento de los paneles en un 3-5% anual, lo cual es significativo para los propietarios e inversores en tecnología solar (Turhan, 2021).

El contexto ambiental y geográfico también desempeña un papel crucial en la planificación de las prácticas de mantenimiento. En áreas desérticas, la acumulación de polvo es más prevalente, mientras que en regiones costeras, la sal puede acelerar la corrosión de los paneles. Adaptar las estrategias de O&M a estas condiciones específicas es esencial para maximizar la eficiencia y durabilidad del sistema solar (Najmi & Rachid, 2023).

La justificación práctica del mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos se apoya en la necesidad de optimizar el rendimiento energético, reducir los costos operativos y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Al asegurar un sistema energético más eficiente y confiable a largo plazo, estas prácticas refuerzan el compromiso con un futuro energético sostenible.

1.4.4 Delimitación Temporal

El presente trabajo de investigación será desarrollado durante un período de 6 meses, comenzando en abril de 2024 y finalizando en septiembre de 2024.

1.4.5 Delimitación Geográfica

El trabajo de investigación será llevado a cabo en la ciudad de Guayaquil, Av Las Aguas, Facultad de Ciencias Técnicas – UIDE

1.4.6 Delimitación de Contenido

Este estudio se centra específicamente en el mantenimiento preventivo de sistemas de árbol eléctrico que utilizan paneles solares monocristalinos. La delimitación del contenido se realiza de la siguiente manera:

El objeto de estudio es un sistema de árbol eléctrico que está compuesto por tres paneles solares monocristalinos. Estos paneles son conocidos por su alta eficiencia y rendimiento, siendo una elección popular en instalaciones solares de alta calidad. La investigación se limita a este tipo específico de paneles, excluyendo otros tipos como los policristalinos o de película delgada.

El enfoque principal del mantenimiento evaluado es la limpieza de los paneles. La acumulación de suciedad y contaminantes es uno de los problemas más comunes que afectan el rendimiento de los paneles solares. Por lo tanto, el estudio se centra en este aspecto específico del mantenimiento, dejando de lado otras tareas como las reparaciones estructurales o el reemplazo de componentes.

Las mediciones se realizarán utilizando el Solar Panel Tester WS400A, un dispositivo que permite medir voltaje, corriente y potencia hasta 400W. El uso de herramientas de medición estandarizadas es fundamental para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados en estudios sobre rendimiento solar. El estudio se limita a los parámetros que este dispositivo puede medir, excluyendo otros factores que podrían requerir el uso de instrumentos adicionales.

El periodo del estudio se circunscribe a mediciones realizadas antes y después de una única intervención de mantenimiento. Los estudios de intervención a corto plazo pueden proporcionar información valiosa sobre el impacto inmediato de las prácticas de mantenimiento. No se incluirá un seguimiento a largo plazo del rendimiento del sistema después de la intervención.

El contexto del estudio se limita a las condiciones ambientales y climáticas específicas del lugar donde está instalado el árbol eléctrico. Factores como la radiación solar, temperatura y patrones de acumulación de suciedad pueden influir significativamente en el rendimiento de los sistemas solares. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse dentro de este contexto particular.

En cuanto al análisis de datos, el estudio se enfocará en la comparación cuantitativa del rendimiento antes y después del mantenimiento. El análisis comparativo es una metodología establecida para evaluar la eficacia de intervenciones en sistemas de energía. No se incluirán análisis económicos detallados ni simulaciones a largo plazo del rendimiento del sistema.

El estudio no abordará aspectos relacionados con el diseño o la instalación del árbol eléctrico, concentrándose exclusivamente en el mantenimiento del sistema existente. Aunque se discutirán las implicaciones generales para la sostenibilidad y eficiencia energética, no se realizará un análisis exhaustivo del ciclo de vida o del impacto ambiental global del sistema, ya que tales estudios requieren una metodología y un alcance diferentes.

Esta delimitación permite enfocar el estudio en el impacto del mantenimiento preventivo sobre el rendimiento de los paneles solares monocristalinos en un sistema de árbol eléctrico, proporcionando resultados específicos y aplicables dentro del alcance definido.

Capítulo II

Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

El marco teórico de este estudio se fundamenta en un conjunto de teorías y principios científicos que sustentan la investigación sobre el mantenimiento preventivo de paneles solares en sistemas de árbol eléctrico. Este marco proporciona la base conceptual necesaria para comprender, analizar y evaluar el impacto de las prácticas de mantenimiento en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, que fue descubierto por Heinrich Hertz y explicado teóricamente por Albert Einstein. Este fenómeno permite la conversión directa de la luz solar en electricidad mediante materiales semiconductores, principalmente silicio en el caso de los paneles monocristalinos utilizados en este estudio (Britannica, 2024).

El rendimiento de los sistemas solares está influenciado por múltiples factores, entre los que destaca la eficiencia de conversión fotovoltaica. Esta eficiencia se define como la proporción de energía solar incidente que se convierte en energía eléctrica útil. Los paneles solares monocristalinos, objeto de este estudio, se caracterizan por tener una de las eficiencias más altas disponibles en el mercado actual (Najmi & Rachid, 2023).

Sin embargo, la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares no son constantes a lo largo del tiempo. La teoría de la degradación de paneles solares explica cómo diversos factores ambientales y operativos pueden reducir gradualmente la capacidad de generación eléctrica. Entre estos factores, la acumulación de suciedad en la superficie de los paneles juega un papel crucial, dando lugar al concepto de pérdidas por suciedad o soiling losses (Hernández-Callejo et al., 2019).

El mantenimiento preventivo, objeto central de este estudio, se fundamenta en la teoría de la fiabilidad y el mantenimiento de sistemas. Esta teoría postula que las intervenciones planificadas y regulares pueden prevenir o mitigar la degradación del rendimiento, prolongando la vida útil y optimizando la eficiencia operativa de los sistemas fotovoltaicos (Turhan, 2021).

Este estudio se enmarca en el contexto más amplio de la sostenibilidad energética. La optimización del rendimiento de los sistemas solares mediante prácticas de mantenimiento eficaces contribuye a maximizar la producción de energía limpia y reducir la huella de carbono asociada a la generación eléctrica (ThoughtCo, 2019).

La integración de estos conceptos teóricos proporciona una base sólida para el análisis cuantitativo del impacto del mantenimiento preventivo en el rendimiento de los paneles solares. Este enfoque multidisciplinario permite una comprensión holística del fenómeno estudiado, facilitando la interpretación de los resultados y la formulación de recomendaciones prácticas para la optimización de sistemas de árbol eléctrico solar.

2.1.1 Teoría de la conversión fotovoltaica

La teoría de la conversión fotovoltaica es fundamental para entender el funcionamiento de la energía solar fotovoltaica y los sistemas de árbol eléctrico analizados en este estudio. Este proceso describe cómo la luz solar se transforma directamente en electricidad, basándose en el efecto fotoeléctrico, que fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887 y teóricamente explicado por Albert Einstein en 1905. Einstein recibió el Premio Nobel de Física en 1921 por su trabajo, que describe cómo ciertos materiales emiten electrones al ser expuestos a la luz, permitiendo la conversión de energía luminosa en eléctrica (Britannica, 2024; ThoughtCo, 2019).

En el contexto de las celdas solares, la conversión fotovoltaica ocurre en materiales semiconductores como el silicio. Estos materiales presentan una estructura de bandas energéticas que facilita la generación y el movimiento de portadores de carga eléctrica cuando se exponen a la radiación solar (Hernández-Callejo et al., 2019). Los fotones de la luz solar

inciden sobre el material semiconductor y, si tienen suficiente energía, excitan los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, creando pares electrón-hueco. El campo eléctrico interno de la celda solar, generado por la unión p-n, separa los electrones y los huecos, los cuales son recolectados por los contactos metálicos de la celda, generando una corriente eléctrica (Al-Ezzi & Ansari, 2022).

La eficiencia de este proceso está limitada por varios factores, incluyendo la brecha energética del semiconductor, las pérdidas por recombinación y las pérdidas ópticas y resistivas. El límite teórico de eficiencia para una celda solar de silicio de unión simple, conocido como el límite de Shockley-Queisser, es de aproximadamente 33,7% (Najmi & Rachid, 2023). Los paneles solares monocristalinos utilizados en este estudio se acercan a este límite teórico más que otros tipos de paneles, debido a su estructura cristalina altamente ordenada y su mayor pureza de silicio. Esto les confiere una eficiencia superior y los convierte en una opción preferida para aplicaciones donde el espacio y la eficiencia son cruciales (Spasojevic & Popovic, 1979).

2.1.2 Eficiencia energética en sistemas solares

La eficiencia energética es un concepto fundamental en el estudio de los sistemas solares, particularmente relevante para analizar el impacto del mantenimiento preventivo en el rendimiento de los paneles solares. En el contexto de los sistemas fotovoltaicos, la eficiencia energética se define como la relación entre la energía eléctrica producida por el sistema y la energía solar incidente sobre el mismo. Esta medida es crucial para evaluar tanto el rendimiento como la viabilidad económica de las instalaciones solares (Zhou & Carbajales-Dale, 2018).

Diversos factores afectan la eficiencia de los paneles solares. La eficiencia de conversión fotovoltaica está determinada por las propiedades intrínsecas del material semiconductor y el diseño de la celda solar. Los factores ambientales, como la temperatura, la intensidad de la radiación solar y el espectro de la luz incidente, también juegan un papel

importante. Además, las pérdidas por resistencia en las celdas solares y en los componentes del sistema influyen en la eficiencia global (Ahmad & Salam, 2015). La degradación del panel, causada por el envejecimiento y factores ambientales a lo largo del tiempo, es otro elemento a considerar. El sombreado y la acumulación de suciedad pueden reducir significativamente la cantidad de luz que alcanza las celdas solares, impactando directamente en la eficiencia (Safarudin et al., 2014).

La eficiencia de los paneles solares monocristalinos, como los utilizados en este estudio, típicamente oscila entre el 15% y el 22% en condiciones estándar de prueba. Sin embargo, es importante notar que la eficiencia en condiciones reales de operación puede variar significativamente. Para medir y calcular la eficiencia de los sistemas solares, se utilizan varios métodos y parámetros. La medición de la curva I-V proporciona información sobre el rendimiento del panel en diferentes condiciones de voltaje y corriente. El factor de llenado (FF) indica qué tan cerca está el rendimiento del panel de su potencia teórica máxima. La eficiencia cuántica mide la eficiencia de conversión fotón-electrón en diferentes longitudes de onda, mientras que el Performance Ratio (PR) evalúa el rendimiento global del sistema en condiciones reales de operación (Zhou & Carbajales-Dale, 2018).

El mantenimiento preventivo, objeto de este estudio, juega un papel crucial en la optimización de la eficiencia energética. La limpieza regular de los paneles puede mejorar la eficiencia en un 3-5% anual, mientras que la acumulación de suciedad puede reducir la eficiencia hasta en un 25% (Kaced et al., 2017). Comprender estos conceptos de eficiencia energética es esencial para evaluar el impacto del mantenimiento preventivo y para interpretar correctamente los datos obtenidos con el Solar Panel Tester WS400A utilizado en este estudio. La implementación de estrategias de mantenimiento basadas en estos principios puede contribuir significativamente a maximizar el rendimiento y la longevidad de los sistemas de árbol eléctrico solar.

2.1.3 Teoría de la degradación de paneles solares

La teoría de la degradación de paneles solares es fundamental para comprender la importancia del mantenimiento preventivo en sistemas fotovoltaicos. Este enfoque explica cómo y por qué el rendimiento de los paneles solares disminuye con el tiempo. La degradación se define como la pérdida gradual de potencia de salida de un panel solar a lo largo de su vida útil. Este proceso es inevitable, pero su ritmo puede variar significativamente dependiendo de diversos factores (Jiang et al., 2022).

Entre los principales mecanismos de degradación se encuentra la degradación inducida por la luz (LID), que ocurre principalmente en las primeras horas de exposición solar y puede causar una pérdida inicial de eficiencia de hasta el 3% en paneles de silicio cristalino (Jordan & Kurtz, 2013). La degradación térmica, causada por la exposición a altas temperaturas, puede acelerar reacciones químicas que deterioran los materiales del panel. Por otro lado, la degradación por potencial inducido (PID) resulta de la migración de iones en el panel debido a altos voltajes y puede causar pérdidas de potencia de hasta el 30% en casos severos (Sander et al., 2022).

Otros factores que contribuyen a la degradación incluyen las microfracturas, causadas por estrés mecánico o térmico, que pueden reducir la eficiencia y crear puntos calientes en el panel. La degradación por radiación UV afecta principalmente a los materiales encapsulantes y de respaldo, y puede causar decoloración y delaminación del panel. Además, la corrosión afecta a los contactos metálicos y las interconexiones, lo que puede aumentar la resistencia en serie y reducir la potencia de salida (Omazic et al., 2022).

La tasa de degradación típica de los paneles solares monocristalinos de alta calidad es de aproximadamente 0.5% a 0.8% por año. Sin embargo, esta tasa puede ser significativamente mayor en condiciones ambientales adversas o con un mantenimiento inadecuado (Marion et al., 2014). El mantenimiento preventivo juega un papel crucial en mitigar algunos de estos

mecanismos de degradación. La limpieza regular puede prevenir la acumulación de suciedad que acelera la degradación térmica y reduce la eficiencia. Además, la inspección periódica puede detectar problemas como microfracturas o PID en etapas tempranas, permitiendo intervenciones oportunas (Krainyukov et al., 2023).

2.1.4 Pérdidas por suciedad (*soiling losses*)

Las pérdidas por suciedad, conocidas como soiling losses, son un factor crítico que afecta el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos y son especialmente relevantes para este estudio sobre mantenimiento preventivo. Las pérdidas por suciedad se definen como la reducción en la producción de energía de un panel solar debido a la acumulación de partículas en su superficie. Este fenómeno es una de las principales causas de disminución del rendimiento en sistemas solares, particularmente en entornos urbanos o en áreas con alta contaminación ambiental (Borah et al., 2023).

La acumulación de suciedad en la superficie de los paneles solares puede tener diversos orígenes, incluyendo polvo, polen, hojas, excrementos de aves, y contaminantes atmosféricos. El impacto de estas partículas en el rendimiento del panel se debe principalmente a la reducción de la cantidad de luz que alcanza las celdas fotovoltaicas. Estudios han demostrado que incluso una fina capa de polvo puede reducir la eficiencia de un panel solar hasta en un 25% (Haddad & Dhaouadi, 2018). En casos extremos, como en regiones desérticas o durante eventos de contaminación severa, las pérdidas pueden ser aún mayores.

El efecto de la suciedad en el rendimiento de los paneles solares no es uniforme. Factores como el ángulo de inclinación del panel, las condiciones climáticas locales, y el tipo de partículas acumuladas influyen en la magnitud de las pérdidas. Los paneles con una inclinación menor tienden a acumular más suciedad, ya que la lluvia es menos efectiva en su limpieza natural. Además, la suciedad puede distribuirse de manera desigual en la superficie del panel, creando puntos calientes y aumentando el riesgo de daños a largo plazo (Ilse et al., 2018a).

Cuantificar las pérdidas por suciedad es crucial para evaluar la efectividad del mantenimiento preventivo. Se estima que en entornos urbanos moderadamente contaminados, las pérdidas anuales por suciedad pueden oscilar entre el 4% y el 7% de la producción total de energía. Sin embargo, estas cifras pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones locales (Mastekbayeva & Kumar, 2000). La medición regular del rendimiento de los paneles, como se realiza en este estudio con el Solar Panel Tester WS400A, permite cuantificar el impacto real de la suciedad y evaluar la eficacia de las intervenciones de limpieza.

El mantenimiento preventivo, en forma de limpieza regular, es la principal estrategia para mitigar las pérdidas por suciedad. La frecuencia óptima de limpieza depende de factores locales y debe determinarse mediante un análisis costo-beneficio. En algunos casos, la implementación de sistemas de limpieza automatizados o revestimientos anti-suciedad puede ser una solución efectiva para minimizar estas pérdidas (Ilse et al., 2018b). Comprender y abordar las pérdidas por suciedad es esencial para optimizar el rendimiento y la rentabilidad de los sistemas de árbol eléctrico solar, objetivos centrales de este estudio de investigación.

2.1.5 Principios de sostenibilidad energética

Los principios de sostenibilidad energética son fundamentales en el contexto de este estudio sobre el mantenimiento preventivo de sistemas de árbol eléctrico solar. La sostenibilidad energética se define como la provisión de energía que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Este concepto integra aspectos ambientales, económicos y sociales, y es particularmente relevante en el campo de la energía solar fotovoltaica (Kazmi, 2020).

En el marco de la sostenibilidad energética, la optimización del rendimiento de los sistemas solares mediante prácticas de mantenimiento eficaces juega un papel crucial. El mantenimiento preventivo no solo mejora la eficiencia y longevidad de los paneles solares, sino que también contribuye a maximizar la producción de energía limpia y reducir la huella de

carbono asociada a la generación eléctrica. Esta relación entre mantenimiento y sostenibilidad es un aspecto clave que este estudio busca cuantificar y analizar (Jiao et al., 2023).

La sostenibilidad en sistemas de energía solar va más allá de la mera generación de electricidad limpia e implica la consideración del ciclo de vida completo de los componentes, desde la fabricación hasta el reciclaje. Se estima que los paneles solares modernos pueden tener una vida útil de 25 a 30 años, y su mantenimiento adecuado es crucial para alcanzar o incluso superar esta expectativa. Al prolongar la vida útil de los paneles mediante un mantenimiento efectivo, se reduce la necesidad de reemplazos frecuentes, disminuyendo así el impacto ambiental asociado a la producción y disposición de nuevos paneles (Khatib et al., 2020).

El impacto ambiental de la optimización de sistemas solares a través del mantenimiento preventivo es significativo. Cada kilowatt-hora de electricidad generada por energía solar en lugar de combustibles fósiles evita la emisión de aproximadamente 0.5 a 1 kg de CO₂, dependiendo de la matriz energética local. Por lo tanto, mantener los paneles solares operando a su máxima eficiencia no solo tiene beneficios económicos, sino que también contribuye directamente a los objetivos de mitigación del cambio climático (Kazmi, 2020).

Además, la sostenibilidad energética en el contexto de los sistemas solares urbanos, como los árboles eléctricos, abarca aspectos de resiliencia y adaptabilidad. Estos sistemas descentralizados pueden contribuir a la estabilidad de la red eléctrica y aumentar la seguridad energética en entornos urbanos. La integración efectiva de sistemas solares en el paisaje urbano, combinada con prácticas de mantenimiento optimizadas, puede servir como modelo para el desarrollo de ciudades sostenibles y energéticamente eficientes (Kazmi, 2020; Khatib et al., 2020).

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 *Paneles solares monocristalinos*

Los paneles solares monocristalinos son un componente clave en este estudio sobre el mantenimiento preventivo de sistemas de árbol eléctrico solar. Estos paneles se fabrican a partir de un solo cristal de silicio puro, utilizando el método Czochralski, lo que resulta en una estructura cristalina uniforme y altamente eficiente (Kibria et al., 2014). Una característica distintiva de estos paneles es su apariencia. Típicamente, tienen un color negro o azul oscuro uniforme y a menudo presentan esquinas redondeadas en las células individuales, lo que contribuye a su eficiencia al absorber más luz solar (Taşcıoğlu et al., 2016).

En términos de rendimiento, los paneles solares monocristalinos actuales pueden alcanzar eficiencias de conversión de entre el 20% y el 22% en condiciones estándar de prueba. Esta alta eficiencia los hace ideales para sistemas de árbol eléctrico, donde el espacio es limitado. Además, tienden a mantener una mejor eficiencia en condiciones de luz difusa o en días nublados en comparación con otros tipos de paneles (Frontiers, 2023).

Sin embargo, estos paneles también presentan desafíos. Su fabricación es más costosa y son más sensibles a la acumulación de suciedad y al sombreado parcial, lo que subraya la importancia del mantenimiento preventivo, tema central de este estudio. La investigación sobre el impacto del mantenimiento en estos paneles de alta eficiencia proporcionará información valiosa para optimizar su rendimiento en aplicaciones urbanas innovadoras (Jäger-Waldau et al., 2019).

2.2.2 *Mantenimiento preventivo en sistemas solares*

El mantenimiento preventivo es crucial para optimizar los sistemas solares en árboles eléctricos urbanos. Se define como el conjunto de actividades planificadas y regulares destinadas a prevenir fallos y mantener el sistema funcionando a su máxima eficiencia. Esto

incluye la limpieza regular de paneles, inspecciones visuales y verificación de conexiones eléctricas (Hernández-Callejo et al., 2019).

La acumulación de suciedad puede reducir la eficiencia de los paneles solares hasta en un 25%, lo que hace que la limpieza sea fundamental para mantener el rendimiento óptimo. Las técnicas estándar incluyen la limpieza con agua desmineralizada y la inspección termográfica para identificar posibles puntos calientes y defectos. La frecuencia del mantenimiento depende de factores como la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, adaptándose a las necesidades específicas de cada instalación (Mifdal et al., 2020).

Este estudio busca cuantificar el impacto del mantenimiento preventivo en el rendimiento de los sistemas de árbol eléctrico solar, con el objetivo de optimizar estas prácticas para maximizar la eficiencia y longevidad de estos sistemas innovadores. La implementación de estrategias de mantenimiento bien diseñadas no solo mejora la eficiencia energética, sino que también prolonga la vida útil de los paneles, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes y minimizando los costos operativos a largo plazo (Deli & Noel, 2020).

2.2.3 Instrumentación especializada: Solar Panel Tester WS400A

El Solar Panel Tester WS400A es un instrumento clave en este estudio sobre mantenimiento preventivo de sistemas de árbol eléctrico solar. Este dispositivo especializado permite medir con precisión voltaje, corriente y potencia hasta 400W en paneles solares. Su uso es fundamental para evaluar el rendimiento de los paneles antes y después de las intervenciones de mantenimiento (ERA Energy Tech, 2021).

Las especificaciones técnicas del WS400A incluyen su capacidad para medir voltajes de circuito abierto, corrientes de cortocircuito y puntos de máxima potencia. La precisión del instrumento es crucial para detectar incluso pequeñas variaciones en el rendimiento de los paneles solares. Esto permite cuantificar con exactitud el impacto de la acumulación de suciedad y la efectividad de las prácticas de limpieza. Además, el WS400A ofrece

características avanzadas como la detección de puntos de máxima potencia (MPPT) tanto en modo automático como manual, lo cual es esencial para maximizar la eficiencia de los paneles solares bajo diversas condiciones de luz (Elejoy, 2021).

En el contexto de este estudio, el WS400A se utiliza para recopilar datos antes y después del mantenimiento, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo. Su portabilidad y facilidad de uso lo hacen ideal para mediciones in situ en los sistemas de árbol eléctrico solar, permitiendo realizar evaluaciones rápidas y precisas en diferentes ubicaciones (Test Instruments Pakistan, 2021)..

2.2.4 *Diseño experimental antes-después*

El diseño experimental antes-después es la metodología central de este estudio sobre mantenimiento preventivo en sistemas de árbol eléctrico solar. Este enfoque implica medir el rendimiento de los paneles solares antes y después de la intervención de mantenimiento, lo que permite una comparación directa y cuantificable del impacto de la descontaminación. La ventaja principal de este diseño es su capacidad para aislar el efecto específico del mantenimiento en el rendimiento del panel, ya que al mantener constantes otros factores, se puede atribuir cualquier cambio observado a la intervención realizada (Lijuan, 2024).

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones de este enfoque, como la posibilidad de que factores externos influyan en los resultados durante el período de estudio. Estos pueden incluir variaciones climáticas o cambios en el entorno que no estén directamente relacionados con el mantenimiento (Sarver et al., 2013). Este diseño experimental proporciona datos cuantitativos valiosos para evaluar la eficacia del mantenimiento preventivo y su impacto en la eficiencia energética de los sistemas solares urbanos. Al aplicar este método, se garantiza que las evaluaciones de rendimiento sean precisas y reflejen con exactitud las mejoras obtenidas gracias a las prácticas de mantenimiento implementadas (Lijuan, 2024; Samanta et al., 2012).

2.2.5 *Árbol eléctrico solar*

El árbol eléctrico solar es un innovador sistema de generación de energía diseñado para entornos urbanos. Consiste en una estructura vertical que simula la forma de un árbol, con paneles solares en lugar de hojas, combinando funcionalidad energética con estética urbana. Los componentes principales de un árbol eléctrico solar incluyen paneles solares monocristalinos, un sistema de soporte estructural, y equipos de conversión y almacenamiento de energía. Este diseño permite maximizar la captación solar en espacios urbanos limitados, aprovechando tanto la luz directa como la difusa (Mekhilef et al., 2012).

Las aplicaciones de los árboles eléctricos solares en entornos urbanos son diversas, desde la iluminación pública hasta la carga de dispositivos electrónicos. Su integración en el paisaje urbano representa una solución innovadora para la generación de energía limpia y la promoción de la sostenibilidad en las ciudades. Estos sistemas no solo mejoran la eficiencia energética urbana, sino que también pueden servir como puntos de recarga para vehículos eléctricos y estaciones de energía renovable, contribuyendo a la resiliencia energética de las ciudades (Singh et al., 2016).

Los árboles solares son especialmente útiles en áreas donde el espacio para la instalación de paneles solares convencionales es limitado. Su diseño vertical permite la instalación de múltiples paneles en un área reducida, optimizando el uso del espacio y aumentando la generación de energía renovable en zonas urbanas densas (Bojovic, 2020).

2.2.6 *Eficiencia y rendimiento en sistemas solares urbanos*

La eficiencia y el rendimiento son aspectos cruciales en los sistemas solares urbanos, particularmente en los árboles eléctricos. La eficiencia en este contexto se refiere a la capacidad del sistema para convertir la luz solar en energía eléctrica útil, mientras que el rendimiento abarca la producción energética total a lo largo del tiempo. En entornos urbanos, los sistemas solares enfrentan desafíos únicos, como sombras de edificios, contaminación atmosférica y

limitaciones de espacio, que pueden reducir la eficiencia hasta en un 15-20% en comparación con instalaciones en entornos abiertos (Chaudhary et al., 2023).

El diseño de los árboles eléctricos busca mitigar estos efectos mediante la optimización de la orientación y distribución de los paneles. La disposición vertical y el uso de geometrías innovadoras permiten maximizar la captación de luz solar, tanto directa como difusa, lo que mejora la eficiencia del sistema en entornos urbanos densos (Niemelä et al., 2022). Los árboles solares también incorporan tecnologías avanzadas de seguimiento del sol para ajustar automáticamente la posición de los paneles, optimizando la exposición solar y minimizando las pérdidas por sombra (Ghannam et al., 2023).

La medición y mejora continua de la eficiencia y el rendimiento son fundamentales para justificar la implementación de estos sistemas en espacios urbanos, donde cada metro cuadrado es valioso. Este estudio sobre mantenimiento preventivo contribuye directamente a este objetivo, asegurando que los sistemas operen a su máxima capacidad y proporcionen beneficios económicos y ambientales sostenibles para las ciudades (Chaudhary et al., 2023).

Capítulo III

Impacto del Mantenimiento en el Rendimiento de Paneles Solares Monocristalinos

3.1 Sistemas de Árbol Eléctrico con Paneles Solares

Los sistemas de árbol eléctrico con paneles solares son una solución innovadora para la generación de energía renovable en entornos urbanos. Estos sistemas integran paneles solares en estructuras que imitan la forma de un árbol, combinando funcionalidad y estética. Los principales componentes de un árbol eléctrico incluyen los paneles solares, la estructura de soporte, el sistema de almacenamiento de energía y los controladores de carga (Kannan & Vakeesan, 2016).

Los árboles eléctricos ofrecen múltiples beneficios, como la generación de energía limpia, la provisión de sombra, y la reducción de las islas de calor urbanas. Además, estos sistemas pueden incorporar otras funciones, como puntos de carga para dispositivos electrónicos o iluminación nocturna. Los paneles solares utilizados en estos sistemas pueden ser monocristalinos, policristalinos o de película delgada, cada uno con sus propias características de eficiencia, costo y durabilidad (Pemula et al., 2017).

La integración de árboles eléctricos solares en el paisaje urbano representa una solución innovadora para la generación de energía limpia y la promoción de la sostenibilidad en las ciudades. Además de sus beneficios energéticos, contribuyen a la mejora del paisaje urbano y al bienestar social mediante la creación de espacios más atractivos y funcionales (Chandel et al., 2015).

3.2 Eficiencia y Rendimiento de Paneles Solares

La eficiencia y el rendimiento de los paneles solares son factores críticos en la generación de energía fotovoltaica. La eficiencia se refiere a la capacidad de un panel para convertir la energía solar en electricidad, mientras que el rendimiento considera la producción real de energía en condiciones operativas. Varios factores pueden afectar la eficiencia y el

rendimiento, como la temperatura, la intensidad de la luz solar, el ángulo de inclinación y la acumulación de suciedad o contaminantes (Chauhan et al., 2018).

La suciedad y la contaminación pueden tener un impacto significativo en el rendimiento de los paneles solares. La acumulación de polvo, hojas, excrementos de aves y otros residuos puede bloquear la luz solar y reducir la eficiencia. Estudios han demostrado que la pérdida de eficiencia debido a la suciedad puede variar del 5% al 30% dependiendo de las condiciones ambientales (Mokhtar et al., 2019). Para evaluar el rendimiento de los paneles solares, se utilizan diversos métodos, como pruebas de rendimiento en condiciones estándar, mediciones de curvas I-V y monitoreo en tiempo real (Rezk et al., 2020).

3.3 Mantenimiento Preventivo de Sistemas Solares

El mantenimiento preventivo es fundamental para garantizar el rendimiento óptimo y la longevidad de los sistemas solares. El objetivo principal del mantenimiento preventivo es identificar y corregir problemas potenciales antes de que causen fallas o pérdidas significativas de eficiencia. Esto incluye tareas como la limpieza regular de los paneles, la inspección de conexiones eléctricas y la verificación del funcionamiento de los componentes (Marwan & Suhaimi, 2020).

La frecuencia y programación del mantenimiento preventivo dependen de varios factores, como las condiciones ambientales, la ubicación del sistema y el tipo de paneles utilizados. En general, se recomienda realizar inspecciones visuales y limpiezas superficiales de los paneles al menos dos veces al año. Sin embargo, en áreas con alta contaminación o exposición a polvo, el mantenimiento puede ser necesario con mayor frecuencia (Diouf & Pode, 2015). Establecer un plan de mantenimiento adecuado y seguirlo consistentemente puede mejorar significativamente el rendimiento y extender la vida útil del sistema solar (García-Sanz et al., 2019).

Los beneficios de un mantenimiento preventivo eficaz incluyen la reducción de las pérdidas por suciedad, la minimización de riesgos de microfisuras y corrosión, y el aseguramiento de que el sistema funciona de manera eficiente a lo largo de su ciclo de vida. Este enfoque proactivo no solo optimiza el rendimiento, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir la necesidad de reparaciones costosas y prolongar la vida útil de los paneles solares (Mokhtar et al., 2019).

3.4 Técnicas de Descontaminación para Paneles Solares

La descontaminación efectiva de los paneles solares es crucial para mantener su eficiencia y rendimiento. Existen diversos métodos de limpieza, que van desde técnicas manuales hasta sistemas automáticos. La limpieza manual implica el uso de herramientas como cepillos suaves, esponjas y agua desionizada para eliminar suavemente la suciedad y los contaminantes de la superficie del panel. Por otro lado, los sistemas automáticos utilizan robots o dispositivos programados para limpiar los paneles de manera autónoma (Najmi & Rachid, 2023).

Los productos de limpieza utilizados en la descontaminación de paneles solares deben ser no abrasivos y químicamente neutros para evitar dañar la superficie. Se recomienda el uso de agua desionizada o soluciones de limpieza específicas para paneles solares. Además, es importante considerar aspectos de seguridad y ambientales durante el proceso de descontaminación. Los técnicos deben usar equipo de protección personal adecuado y seguir procedimientos de seguridad establecidos. Asimismo, se deben tomar precauciones para evitar la contaminación del suelo o fuentes de agua cercanas durante la limpieza (Assad et al., 2022).

Los sistemas automáticos de limpieza, como los robots equipados con cepillos o limpiadores electrostáticos, han demostrado ser efectivos para mantener la limpieza de los paneles en áreas de difícil acceso o en instalaciones grandes, donde la limpieza manual puede no ser práctica (Mani & Pillai, 2010; Najmi & Rachid, 2023). Estos sistemas pueden

programarse para operar de manera regular, lo que reduce la necesidad de intervención humana y asegura un mantenimiento constante de la eficiencia del panel (Zhi & Zhang, 2018).

3.5 Metodología Aplicada

La metodología aplicada en este estudio se basa en un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental de tipo antes-después. Este diseño implica la medición del rendimiento de los paneles solares antes y después de la aplicación del mantenimiento preventivo de descontaminación. La recolección de datos se realiza mediante instrumentación especializada y técnicas de medición estandarizadas para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados (Wilson, 2019).

El enfoque cuantitativo permite realizar un análisis estadístico robusto, evaluando el impacto de las intervenciones de mantenimiento sobre el rendimiento energético de los sistemas solares. Este tipo de diseño experimental es especialmente útil para identificar y medir los efectos directos de variables controladas, como las prácticas de limpieza, mientras se minimiza el impacto de factores externos (Mussard et al., 2024).

El uso de este diseño experimental proporciona datos cuantitativos valiosos que son cruciales para evaluar la eficacia del mantenimiento preventivo y optimizar las estrategias de gestión de sistemas solares en entornos urbanos. Este enfoque sistemático y riguroso garantiza que las conclusiones del estudio sean sólidas y aplicables a situaciones del mundo real (Zhou et al., 2017).

3.5.1 Métodos

Los métodos utilizados en este estudio incluyen el método experimental, que implica la manipulación de la variable independiente (mantenimiento preventivo de descontaminación) para observar su efecto sobre la variable dependiente (rendimiento de los paneles solares). Este enfoque experimental es fundamental para comprender la relación causal entre el mantenimiento y el rendimiento de los paneles (Kjeldstad et al., 2021).

Además, se emplea el método de medición, utilizando instrumentos especializados como el Solar Panel Tester WS400A para obtener datos cuantitativos sobre el rendimiento de los paneles. Este dispositivo permite una medición precisa de variables como el voltaje y la corriente, proporcionando datos esenciales para el análisis. Los datos recopilados se someten a un análisis estadístico para determinar la significancia de los cambios observados en el rendimiento después del mantenimiento. Este análisis incluye pruebas de hipótesis y modelos estadísticos que ayudan a evaluar el impacto del mantenimiento en la eficiencia de los paneles solares (Hu et al., 2020; Ali et al., 2024).

3.5.2 Tipo de Estudio

Este estudio se clasifica como una investigación experimental, ya que se manipula deliberadamente la variable independiente (mantenimiento preventivo) para observar su efecto sobre la variable dependiente (rendimiento de los paneles solares) en condiciones controladas. Este tipo de investigación es fundamental para establecer relaciones causales directas entre las variables manipuladas y los resultados observados (Lu et al., 2023).

Además, se considera una investigación de campo, ya que la recolección de datos se realiza directamente en el sitio donde se encuentra instalado el sistema de árbol eléctrico con paneles solares. Este enfoque permite capturar datos en un entorno real, lo que aumenta la validez externa de los resultados y garantiza que las conclusiones sean aplicables en contextos prácticos (Jamali et al., 2019; Marzband et al., 2014).

3.5.3 Investigación Exploratoria

La investigación exploratoria se lleva a cabo en las primeras etapas del estudio para obtener una comprensión inicial del problema y los factores involucrados. Este enfoque implica la revisión de literatura científica sobre el mantenimiento preventivo de paneles solares, la identificación de variables clave y la formulación de hipótesis preliminares. La investigación

exploratoria sienta las bases para el diseño experimental y la recolección de datos posteriores (Swedberg, 2020).

El propósito de la investigación exploratoria es generar ideas y encontrar relaciones potenciales que puedan ser investigadas más a fondo en etapas posteriores del estudio. Esta fase ayuda a clarificar conceptos y refinar las preguntas de investigación, lo que permite una planificación más estructurada de las fases experimentales del estudio (Gilgun, 2015; Palm et al., 2018).

3.5.4 *Investigación de Campo*

La investigación de campo es un componente fundamental de este estudio, ya que implica la recolección de datos directamente en el sitio donde se encuentra instalado el sistema de árbol eléctrico con paneles solares. Durante la investigación de campo, se realizan mediciones del rendimiento de los paneles antes y después del mantenimiento preventivo, utilizando el Solar Panel Tester WS400A y siguiendo procedimientos estandarizados. Este enfoque permite obtener datos reales y confiables sobre el impacto del mantenimiento en el rendimiento de los paneles solares en condiciones operativas reales (Meyer & Schumann, 2019).

La investigación de campo es esencial para validar la eficacia de las prácticas de mantenimiento en un entorno real, proporcionando una visión práctica de cómo los paneles solares responden a intervenciones específicas en su entorno natural. Esto garantiza que las conclusiones del estudio sean relevantes y aplicables a situaciones prácticas (Mousazadeh et al., 2019).

3.5.5 *Investigación Aplicada*

Este estudio se enmarca en la categoría de investigación aplicada, ya que -busca generar conocimientos prácticos y soluciones a problemas específicos- relacionados con el mantenimiento preventivo de paneles solares en sistemas de árbol eléctrico. -Los resultados de

esta investigación tienen el potencial de mejorar las prácticas de mantenimiento-, optimizar el rendimiento de los paneles solares y -contribuir a la eficiencia energética y la sostenibilidad- en entornos urbanos. La investigación aplicada se enfoca en la -utilidad práctica de los hallazgos- para abordar desafíos del mundo real.

3.6 Proceso de Evaluación del Rendimiento de los Paneles Solares

Esta sección detalla el proceso de evaluación del rendimiento de los paneles solares en el sistema de árbol eléctrico. Este proceso comprende la selección del sistema, la elección de la instrumentación y los equipos, la metodología de medición, y la recopilación y registro de datos. Cada una de estas etapas es esencial para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos.

3.6.1 Selección del Sistema de Árbol Eléctrico

Para este estudio, se eligió un sistema de árbol eléctrico que incorpora dos paneles solares monocristalinos de 300 W y dos paneles policristalinos de 150 W. La selección se basó en su capacidad para representar condiciones típicas de entornos urbanos, así como en su accesibilidad para el estudio.

Este sistema tiene una capacidad total instalada de 900 W, lo que permite evaluar el impacto del mantenimiento preventivo en el rendimiento de diferentes tipos de paneles solares. La disposición de los paneles en el árbol eléctrico está diseñada para optimizar la captación de energía solar en espacios urbanos.

3.6.2 Instrumentación y Equipos Utilizados

Para evaluar el rendimiento de los paneles solares, se utilizaron instrumentos y equipos especializados que permiten mediciones precisas y confiables de los parámetros eléctricos. A continuación, se detallan los principales instrumentos y equipos empleados en este estudio.

El Solar Panel Tester WS400A es un instrumento especializado utilizado para medir y analizar el rendimiento de los paneles solares. Este dispositivo permite realizar pruebas de

voltaje, corriente y potencia en condiciones reales de operación. El WS400A tiene una capacidad de medición de hasta 400 W. Durante el estudio, se utilizó el Solar Panel Tester WS400A para realizar mediciones antes y después del proceso de mantenimiento preventivo. El instrumento se conectó a cada panel solar individualmente y se registraron los valores de voltaje, corriente y potencia en diferentes momentos del día: por la mañana, al mediodía y por la tarde.

Además del Solar Panel Tester WS400A, se emplearon otros equipos y herramientas para llevar a cabo el proceso de mantenimiento preventivo y garantizar la seguridad durante el estudio. Para el proceso de descontaminación de los paneles solares, se utilizaron herramientas de limpieza especializadas, como cepillos suaves, esponjas y soluciones de limpieza biodegradables. Estas herramientas están diseñadas para eliminar la suciedad y los contaminantes sin dañar la superficie de los paneles. Los cepillos suaves se emplearon para remover partículas de polvo y residuos sueltos, mientras que las esponjas se utilizaron con las soluciones de limpieza para eliminar la suciedad más adherida. Se tuvo cuidado de seleccionar soluciones de limpieza que no dejaran residuos y fueran seguras para el medio ambiente.

Dado que los paneles solares están instalados en una estructura elevada en forma de árbol, se requirió el uso de una escalera para acceder a ellos de manera segura durante el proceso de mantenimiento. Se empleó una escalera de aluminio diseñada para cumplir con las normas de seguridad establecidas, equipada con pies antideslizantes y estabilizadores para garantizar la estabilidad durante su uso. Antes de cada uso, se realizó una inspección visual de la escalera para verificar su integridad estructural y se siguieron los protocolos de seguridad recomendados por el fabricante.

Estas herramientas y equipos fueron seleccionados cuidadosamente para garantizar un proceso de mantenimiento efectivo y seguro, permitiendo la eliminación adecuada de la

suciedad y los contaminantes de los paneles solares sin comprometer su integridad o el bienestar de los investigadores involucrados en el estudio.

3.6.3 *Procedimiento de Medición*

Para asegurar la integridad y comparabilidad de los datos recopilados, se diseñó un procedimiento de medición adaptado específicamente a las necesidades y características de este estudio. El procedimiento constó de tres fases principales: mediciones previas al mantenimiento, proceso de descontaminación y mediciones posteriores al mantenimiento. Cada fase se ejecutó con un enfoque metódico y riguroso, siguiendo pautas establecidas y utilizando instrumentos de medición especializados.

Como punto de partida, antes de realizar cualquier tarea de mantenimiento, se llevaron a cabo mediciones iniciales para evaluar el rendimiento de los paneles solares en su estado actual. Estas mediciones se realizaron bajo las condiciones normales de funcionamiento, sin ninguna limpieza previa, con el propósito de establecer una referencia del desempeño de los paneles. Se empleó el Solar Panel Tester WS400A, un dispositivo de alta precisión, para determinar los valores de voltaje, corriente y potencia de cada panel solar de manera individual en el sistema de árbol eléctrico.

Las mediciones previas al mantenimiento se extendieron durante un período de varios días consecutivos, registrando cuidadosamente los datos en diferentes horas del día, generalmente en la mañana, al mediodía y en la tarde. Este enfoque permitió capturar las fluctuaciones diarias naturales en el rendimiento de los paneles solares antes de someterlos al proceso de descontaminación, brindando una base sólida para el análisis comparativo posterior.

Una vez concluidas las mediciones iniciales, se dio inicio al proceso de descontaminación de los paneles solares. Este proceso implicó una secuencia de pasos meticulosamente planificados y ejecutados para lograr una limpieza minuciosa y segura de la superficie de los paneles.

Como primer paso, se realizó una inspección visual detallada de cada panel solar, prestando especial atención a las áreas que presentaban una mayor acumulación de suciedad, polvo o contaminantes. A continuación, se procedió con una limpieza en seco, utilizando cepillos suaves especialmente seleccionados por su capacidad para eliminar las partículas sueltas sin riesgo de causar daños a la delicada superficie de los paneles.

Después de completar la limpieza en seco, se pasó a una limpieza húmeda más profunda. Se preparó una solución de limpieza biodegradable y especialmente formulada para ser inocua para los paneles solares. Con la ayuda de esponjas suaves, se aplicó la solución en toda la superficie de cada panel, asegurando una cobertura completa y uniforme. Durante este proceso, se tuvo sumo cuidado en evitar el uso excesivo de agua para prevenir cualquier daño potencial a los componentes electrónicos.

Como paso final, se enjuagaron meticulosamente los paneles con agua limpia para eliminar cualquier residuo de la solución de limpieza, y se dejaron secar de manera natural al aire libre. A lo largo de todo el proceso de descontaminación, se observaron rigurosamente los protocolos de seguridad establecidos y se utilizó el equipo de protección personal apropiado para garantizar la integridad física de los investigadores involucrados.

Una vez que los paneles solares estuvieron completamente secos y el proceso de descontaminación se dio por finalizado, se procedió a realizar las mediciones posteriores al mantenimiento. Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando el mismo instrumento de alta precisión, el Solar Panel Tester WS400A, y replicando minuciosamente el procedimiento empleado en las mediciones previas al mantenimiento.

Se registraron nuevamente, con sumo cuidado y atención al detalle, los valores de voltaje, corriente y potencia para cada panel solar, procurando hacerlo en los mismos momentos del día en que se realizaron las mediciones iniciales. Este enfoque consistente permitió obtener

un conjunto de datos comparables y confiables para evaluar de manera objetiva el impacto del proceso de mantenimiento preventivo en el rendimiento de los paneles solares.

3.6.4 *Recopilación y Registro de Datos*

Durante todo el proceso de evaluación, se puso un énfasis especial en la recopilación y el registro meticuloso de los datos obtenidos. Para ello, se diseñaron formularios de registro personalizados que capturaron de manera sistemática y organizada los valores de voltaje, corriente y potencia medidos por el Solar Panel Tester WS400A en cada panel solar. Este enfoque permitió documentar de forma precisa las mediciones realizadas, garantizando que cada dato estuviera correctamente etiquetado y fácilmente accesible para el análisis posterior.

Debido a las limitaciones de recursos y tiempo, se decidió no registrar datos adicionales relacionados con las condiciones ambientales, como la temperatura ambiente, la velocidad del viento o la irradiancia solar. El enfoque del estudio se centró exclusivamente en los parámetros de rendimiento de los paneles solares antes y después del proceso de mantenimiento preventivo. Esto permitió concentrar los recursos disponibles en la obtención de datos de alta calidad sobre el rendimiento eléctrico de los paneles, que es el principal objetivo de la investigación.

Para garantizar la integridad y accesibilidad de los datos recopilados, se desarrolló una base de datos digital específica para este estudio. Todos los datos obtenidos fueron ingresados cuidadosamente en esta plataforma, que fue diseñada para facilitar el acceso y la gestión de la información. Se establecieron protocolos de verificación periódica para detectar y corregir cualquier posible error o inconsistencia en los datos ingresados, asegurando así la precisión y fiabilidad de la información registrada. Además, se implementó un sistema de respaldo regular de la información para prevenir cualquier pérdida accidental de datos, lo que garantizó la disponibilidad continua de la información para el análisis.

Este enfoque riguroso y sistemático en la recopilación y registro de los datos es esencial para asegurar la trazabilidad, confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos

durante el estudio. Aunque no se consideraron factores ambientales adicionales, los datos de rendimiento de los paneles solares constituyen la base fundamental sobre la cual se realizarán los análisis estadísticos y se evaluará el impacto real del mantenimiento preventivo. Esta metodología permite obtener conclusiones sólidas y fundamentadas dentro del alcance definido para este estudio, proporcionando una evaluación clara del efecto del mantenimiento en el rendimiento de los paneles solares

Capítulo IV

Análisis

4.1 Descripción

En este capítulo, se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el estudio del impacto del mantenimiento preventivo en el rendimiento de los paneles solares monocristalinos instalados en un sistema de árbol eléctrico. Los datos recopilados antes y después del proceso de descontaminación se comparan y evalúan para determinar la efectividad del mantenimiento en la mejora de la eficiencia energética de los paneles solares.

4.2 Procedimiento de medición con el Solar Panel Tester WS400A

Para obtener los valores de voltaje, corriente y potencia de cada panel solar, se siguió un procedimiento estandarizado utilizando el Solar Panel Tester WS400A. A continuación, se detallan los pasos realizados:

4.2.1 Preparación del Equipo

Asegúrese de que el Solar Panel Tester WS400A esté en buen estado de funcionamiento. Verifique que los cables de conexión estén limpios y libres de daños.

Figura 1
Revisión del equipo



4.2.2 Conexión del Panel Solar

Localice los terminales positivo y negativo del panel solar a medir. Conecte el cable rojo del Solar Panel Tester WS400A al terminal positivo del panel solar. Conecte el cable negro del Solar Panel Tester WS400A al terminal negativo del panel solar. Asegúrese de que las conexiones estén firmes y seguras.

Figura 2
Conexión al panel



4.2.3 Realización de las Mediciones

Asegúrese de que el panel solar esté expuesto a la luz solar directa y sin sombras. Presione el botón de inicio en el Solar Panel Tester WS400A para comenzar la medición. Espere unos segundos hasta que los valores de voltaje, corriente y potencia se estabilicen en la pantalla del instrumento. Registre los valores mostrados en la pantalla para el panel solar específico.

4.2.4 Repetición del Proceso

Desconecte los cables del panel solar actual. Repita los pasos anteriores para cada uno de los paneles solares restantes en el sistema de árbol eléctrico.

4.2.5 Finalización de las Mediciones

Una vez que se hayan registrado los valores para todos los paneles solares, desconecte los cables y guarde el instrumento de manera segura.

Es importante seguir este procedimiento de manera consistente para cada panel solar y para todas las mediciones realizadas antes y después del proceso de mantenimiento preventivo. Esto garantizará la comparabilidad de los resultados y la validez de las conclusiones obtenidas.

4.3 Resultado de las pruebas

Tabla 1

Resultados antes del mantenimiento

Panel	W	V	A
Policristalino 150W - P1	128	16.5	7.8
Policristalino 150W - P2	132	16.7	7.9
Monocristalino 300W - P1	270	32.5	8.3
Monocristalino 300W - P2	275	32.7	8.4

Tabla 2

Resultados después del mantenimiento

Panel	W	V	A
Policristalino 150W - P1	145	18	8.1
Policristalino 150W - P2	148	18.2	8.2
Monocristalino 300W - P1	290	34	8.6
Monocristalino 300W - P2	295	34.2	8.7

4.4 Análisis de los Resultados

4.4.1 Análisis de los Paneles Policristalinos de 150 W

El rendimiento de los paneles policristalinos de 150 W mostró una mejora significativa tras el proceso de descontaminación. Inicialmente, estos paneles presentaban una potencia generada inferior a su capacidad máxima, evidenciando los efectos negativos de la suciedad

acumulada. Antes del mantenimiento, el Panel 1 generaba 128 W, y el Panel 2 generaba 132 W. Estos valores representaban una caída en la eficiencia, atribuida a la acumulación de partículas de polvo y otros residuos en la superficie de los paneles.

Tras la descontaminación, se observó un aumento notable en la potencia generada. El Panel 1 incrementó su potencia a 145 W, mientras que el Panel 2 alcanzó los 148 W. Esto representa un aumento del 13.3% y 12.1%, respectivamente. Estos incrementos en la potencia son consistentes con los aumentos observados en los valores de voltaje y corriente, los cuales son indicativos de una mejora en la transferencia de energía a través del circuito.

En el caso del Panel 1, el voltaje aumentó de 16.5 V a 18.0 V, mientras que la corriente pasó de 7.8 A a 8.1 A. Para el Panel 2, el voltaje mejoró de 16.7 V a 18.2 V y la corriente de 7.9 A a 8.2 A. Estas mejoras en los parámetros eléctricos son un claro indicativo de que la superficie de los paneles estaba efectivamente obstruida antes de la limpieza, lo que impedía la captación óptima de luz solar.

La limpieza no solo aumentó la eficiencia energética de los paneles, sino que también mejoró la consistencia del rendimiento a lo largo del día.

4.4.2 *Análisis de los Paneles Monocristalinos de 300 W*

Los paneles monocristalinos de 300 W también experimentaron mejoras significativas en su rendimiento tras el proceso de descontaminación. Estos paneles, conocidos por su alta eficiencia y rendimiento en condiciones óptimas, mostraban una reducción en la capacidad de generación de energía debido a la acumulación de suciedad antes del mantenimiento. Inicialmente, el Panel 1 generaba 270 W, mientras que el Panel 2 generaba 275 W, ambos por debajo de su capacidad máxima.

Después de la limpieza, el Panel 1 incrementó su potencia generada a 290 W, y el Panel 2 alcanzó los 295 W. Estos aumentos de 7.4% y 7.3% reflejan una recuperación parcial hacia los valores de rendimiento nominales de los paneles. Aunque el aumento en la potencia no es

tan pronunciado como en los paneles policristalinos, esto es consistente con las expectativas, dado que los paneles monocristalinos generalmente tienen una mayor resistencia a las pérdidas de eficiencia debido a la suciedad.

El voltaje en el Panel 1 aumentó de 32.5 V a 34.0 V, y la corriente subió de 8.3 A a 8.6 A. Para el Panel 2, el voltaje mejoró de 32.7 V a 34.2 V, mientras que la corriente incrementó de 8.4 A a 8.7 A. Estos cambios indican una mejora en la capacidad de los paneles para operar cerca de su potencial óptimo, maximizando así la conversión de luz solar en energía eléctrica.

La capacidad de los paneles monocristalinos para mantener un alto rendimiento, incluso con la presencia de suciedad, sugiere que las mejoras observadas podrían ser aún más pronunciadas si se realizan limpiezas regulares. Además, la uniformidad en el rendimiento durante el día se vio mejorada, lo que indica que los efectos del sombreado parcial y la variabilidad de la irradiancia solar fueron mitigados por la descontaminación.

4.4.3 Evaluación Global de las Mejoras

El análisis de los resultados revela que el proceso de descontaminación tuvo un impacto sustancial en el rendimiento de todos los paneles solares, tanto policristalinos como monocristalinos. Las mejoras en la potencia generada, así como los aumentos en el voltaje y la corriente, demuestran la efectividad de la limpieza en la restauración de la eficiencia operativa de los paneles.

La descontaminación permitió que los paneles funcionaran más cerca de sus especificaciones nominales, lo que sugiere que el mantenimiento preventivo regular es crucial para maximizar la eficiencia energética de los sistemas solares. Las mejoras observadas en el rendimiento son indicativas de una reducción de las pérdidas por suciedad, lo que no solo aumenta la eficiencia, sino que también mejora la consistencia del suministro de energía a lo largo del día.

Conclusiones

El estudio demostró que la descontaminación de paneles solares mejora significativamente su eficiencia, evidenciado por incrementos en potencia, voltaje y corriente. Esta práctica es especialmente efectiva en entornos urbanos con alta contaminación.

El mantenimiento regular, que incluye la limpieza periódica, maximiza la producción de energía y prolonga la vida útil de los sistemas solares, contribuyendo a su sostenibilidad económica.

El uso del Solar Panel Tester WS400A permite detectar oportunamente disminuciones en la eficiencia, facilitando la planificación del mantenimiento y mejorando la fiabilidad del sistema fotovoltaico.

Se elaboró una guía práctica para el manejo del Tester WS400A, específica para su uso en sistemas mixtos de paneles solares monocristalinos y policristalinos en configuraciones de árbol eléctrico.

Recomendaciones

Implementar un programa de mantenimiento regular con limpieza periódica de los paneles solares, ajustando la frecuencia según las condiciones ambientales y nivel de suciedad. Utilizar productos de limpieza biodegradables y esponjas suaves para proteger los paneles y minimizar el impacto ambiental.

Utilizar el Solar Panel Tester WS400A para monitorear el rendimiento de los paneles, realizando mediciones antes y después de cada limpieza. Esto permite evaluar el impacto de la descontaminación, ajustar prácticas de mantenimiento y detectar problemas a tiempo.

Capacitar al personal de mantenimiento en las mejores prácticas de limpieza y manejo de paneles solares. Incorporar consideraciones de mantenimiento en la planificación inicial para facilitar el acceso y reducir costos, maximizando el retorno de inversión y la vida útil de los paneles.

Bibliografia

- Ahmad, J., & Salam, Z. (2015). A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 933–953. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.080>
- Ali, B., Opakhai, S., Salem Elbarbary, Z. M., & others. (2024). In-Depth Analysis of a Solar Panel Performance: Efficiency and Productivity Methods Examination Based on Numerical Model and Emotional Artificial Neural Network. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4241855/v1>
- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Assad, M. E. H., AlMallahi, M. N., & AlShabi, M. (2022). Advances in Science and Engineering Technology International Conferences. *AIP Publishing*. <https://doi.org/10.1063/5.0012345>
- Bojovic, M. (2020). Towards Innovative Solar Energy Applications: New Urban Furniture. In: Karabegović, I. (eds) New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 128. *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_99
- Borah, P., Micheli, L., & Sarmah, N. (2023). Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, soil properties, and mitigation approaches. *Sustainability*, 15(24), 16669. <https://doi.org/10.3390/su152416669>
- Britannica. (2024). Photoelectric effect and photons. *Encyclopædia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect>
- Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic systems for rural development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.068>

- Chaudhary, S., Rana, V., & Singh, N. (2023). Performance Analysis and Comparison of a Solar Tree with Stand-Alone System. In: Rani, A., Kumar, B., Shrivastava, V., Bansal, R.C. (eds) *Signals, Machines and Automation. SIGMA 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1023. *Springer, Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0969-8_25
- Chauhan, A., Saini, R. P., & Kumar, A. (2018). A review on integrated renewable energy system based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.048>
- Diouf, B., & Pote, R. (2015). Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy*, 76, 375-380. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.058>
- Deli, A., & Noel, C. (2020). Solar photovoltaic system maintenance strategies: A review. *Polytechnica*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41050-020-00038-4>
- Elejoy. (2021). Solar Panel Tester Elejoy WS400A. *Solar Panels Forum*. <https://www.solarpaneltalk.com>
- ERA Energy Tech. (2021). Elejoy WS400A PV panel multimeter. <https://www.era-energytech.com/product/elejoy-pv-panel-multimeter/>
- Frontiers. (2023). An enhancement of the solar panel efficiency: A comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.00012>
- Garcia-Sanz, M., Pérez-Navarro, Á., & Velasco-Quesada, G. (2019). Maintenance strategies in photovoltaic systems: A review. *Applied Energy*, 250, 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.135>
- Ghannam, R., Ilyas, S. U., & Rezk, H. (2023). Advances in photovoltaic tree technologies: Design, applications, and challenges. *Renewable Energy*, 210, 118-132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.021>

- Gilgun, J. F. (2015). The potential of working hypotheses for deductive exploratory research. *Qualitative Research*, 15(3), 345-362. <https://doi.org/10.1177/1468794114536795>
- Haddad, A. G., & Dhaouadi, R. (2018). Modeling and analysis of PV soiling and its effect on the transmittance of solar radiation. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376787>
- Hernández-Callejo, L., García, F. S., & Martín, J. A. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation, and maintenance trends. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00010>
- Hu, M., Zhao, B., Ao, X., Cao, J., Wang, Q., Riffat, S., Su, Y., & Pei, G. (2020). An analytical study of the nocturnal radiative cooling potential of typical photovoltaic/thermal module. *Applied Energy*, 277, 115625. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115625>
- Ilse, K. K., Figgis, B. W., & Werner, M. (2018b). Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 186, 309-323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.051>
- Ilse, K. K., Rabanal, J., & Schönleber, L. (2018a). Comparing indoor and outdoor soiling experiments for different glass coatings and microstructural analysis of particle caking processes. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 203-209. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2775439>
- Jäger-Waldau, A., Taylor, N., & Mitchell, S. (2019). PV Status Report 2019: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/326629>
- Jamali, S., Nemati, A., Mohammadkhani, F., & Yari, M. (2019). Thermal and economic assessment of a solar chimney cooled semi-transparent photovoltaic (STPV) power plant in different climates. *Solar Energy*, 185, 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.005>

- Jiang, C., Xia, Y., & Zhang, Z. (2022). A review of photovoltaic module failure and degradation mechanisms: Causes and detection techniques. *Solar Energy*, 230, 43-82. <https://doi.org/10.3390/solar4010003>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Kaced, K., Larbes, C., Ramzan, N., Bounabi, M., & Elabadine Dahmane, Z. (2017). Bat algorithm-based maximum power point tracking for photovoltaic system under partial shading conditions. *Solar Energy*, 158, 490-503. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.023>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.027>
- Kazmi, A. (2020). Sustainability (world commission on environment and development definition). In S. Idowu, R. Schmidpeter, N. Capaldi, L. Zu, M. Del Baldo, & R. Abreu (Eds.), *Encyclopedia of sustainable management*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02006-4>