

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“RASTREADORES SOLARES PARA MEJORAR EL
RENDIMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LAS
ZONAS RURALES DEL PERÚ – 2024”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

AUTORES:

Bach. COTERA CUTTI, PAOLO CESAR

Bach. ROJAS LEDESMA, JORGE DILAM

Bach. VERASTEGUI RIOS, JOHAN ALBERTO

ASESOR:

Dr. Lic. TEJADA CABANILLAS, ADAN ALMIRCAR

LINEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2024

PERÚ

TESIS_JOHAN_PAOLO_JORGE

9%
Textos sospechosos



8% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas
< 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: TESIS_JOHAN_PAOLO_JORGE.pdf
ID del documento: 0c18437c2f664c87649fc6246f3c79c5f192cac1
Tamaño del documento original: 934,13 kB

Depositante: FIEE PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION
Fecha de depósito: 26/6/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 26/6/2024

Número de palabras: 17.459
Número de caracteres: 122.707

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.uncp.edu.pe	2%		Palabras idénticas: 2% (360 palabras)
2	dialnet.unirioja.es 2 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (268 palabras)
3	repositorio.unac.edu.pe 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (99 palabras)
4	dspace.ups.edu.ec	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (151 palabras)
5	TESIS_SANDRA_RODRIGO_ANDRE.docx TESIS_SANDRA_RODRIGO_ANDRE #a6688b El documento proviene de mi biblioteca de referencias 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (113 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.uta.edu.ec	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
2	www.programasolar.com Qué son los paneles solares fotovoltaicos: definición y ...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (31 palabras)
3	polodelconocimiento.com	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
4	repositorioslatinoamericanos.uchile.cl Diseño del colector solar térmico de un si...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
5	repositorio.uncp.edu.pe	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ACTA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL POR LA MODALIDAD DE
TESIS SIN CICLO DE TESIS

Al día 23 del mes de agosto de 2024 siendo las 12:00 horas se reunió el Jurado Examinador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao, aprobada mediante Resolución Decanal N°185-2024-DFIEE, conformado por los siguientes docentes ordinarios:

Mg. Ing. PEDRO ANTONIO SANCHEZ HUAPAYA
ING. FREDY ADÁN CASTRO SALAZAR
M.SC. LIC. RAÚL PEDRO CASTRO VIDAL

Presidente
Secretario
Vocal

Asimismo se dio inicio a la exposición de TESIS de los señores Bachilleres **VERÁSTEGUI RIOS, Johan Alberto; COTERA CUTTI, Paolo César y ROJAS LEDESMA, Jorge Dilam**; quienes habiendo cumplido con los requisitos para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electricista de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao; como lo señalan los Arts. N°s 08 al 10 del Reglamento de Grados y Títulos, sustentarán la Tesis Titulada: **"RASTREADORES SOLARES PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LAS ZONAS RURALES DEL PERÚ - 2024"** con el quórum Reglamentario de Ley, se dio inicio a la exposición, considerando lo establecido en el Art. N° 80 del Reglamento de Grados y Títulos dado por Resolución N° 150-23-CU, en el Sub Capítulo II, corresponde al otorgamiento del Título Profesional con Tesis sin Ciclo de Tesis, efectuadas las deliberaciones pertinentes se acordó:

Dar por.....**APROBADO**..... Calificativo.....**BUENO**..... nota:.....**16**..... a los expositores **VERÁSTEGUI RIOS, Johan Alberto; COTERA CUTTI, Paolo César y ROJAS LEDESMA, Jorge Dilam**; con lo cual se dio por concluida la sesión, siendo las...**13:00**..... horas del día del mes y año en curso.

Es copia fiel del folio N° 265 del Libro de Actas de Sustentación de Tesis de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica – UNAC.

.....

.....
Mg. Ing. PEDRO ANTONIO SANCHEZ HUAPAYA
PRESIDENTE

.....

.....
Ing. FREDY ADÁN CASTRO SALAZAR
SECRETARIO

.....

.....
M.SC. LIC. RAUL PEDRO CASTRO VIDAL
VOCAL

.....
SUPLENTE

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

PRESIDENTE : Mg. Ing. PEDRO ANTONIO SANCHEZ HUAPAYA
SECRETARIO : Mg. Ing. FREDY ADAN CASTRO SALAZAR
VOCAL : MSc. Lic. RAUL PEDRO CASTRO VIDAL

ASESOR : Dr. Lic. ADAN ALMIRCAR TEJADA CABANILLAS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y mis hermanos, quienes siempre han sido mi fuente inagotable de apoyo, amor y motivación. A mi familia y amigos de la universidad, por estar ahí en cada paso de este camino académico. A todos aquellos que creyeron en mí y me alentaron a perseguir mis sueños.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Lic. Adán Almircar Tejada Cabanillas, por su guía experta, paciencia y dedicación durante todo este proceso. Sus consejos y retroalimentación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Mis gracias se extienden a mis compañeros de clase y colaboradores, quienes compartieron conocimientos y experiencias que enriquecieron mi investigación.

Finalmente, agradezco a la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Este logro no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de todos ustedes. ¡Gracias!

ÍNDICE

ÍNDICE DE GRÁFICOS	3
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1. Descripción de la realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema.....	10
1.3. Objetivos	11
1.4. Justificación	11
1.4.1. Justificación económica.....	11
1.4.2. Justificación practica	12
1.5. Delimitantes de la investigación.....	12
1.5.1. Delimitante teórica.....	12
1.5.2. Delimitante temporal.....	13
1.5.3. Delimitante espacial	13
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes	14
2.1.1. Antecedentes internacionales	14
2.1.2. Antecedentes nacionales	17
2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Rastreador solar	20
2.2.2. Sistema fotovoltaico	29
2.3. Marco conceptual.....	33
2.4. Definición de términos básicos	34
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	36
3.1. Hipótesis	36
3.1.1. Operacionalización de variable	37
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	38
4.1. Diseño metodológico.....	38
4.2. Método de investigación	38

4.3.	Población y muestra.....	38
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado	39
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	39
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	40
4.7.	Aspectos éticos en investigación	41
V.	RESULTADOS.....	42
5.1.	Descripción general	42
5.2.	Análisis Descriptivo	45
5.3.	Análisis Inferencial	54
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	58
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	60
6.3.	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes.....	63
VII.	CONCLUSIONES.....	65
VIII.	RECOMENDACIONES	66
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXOS	69
	ANEXO N.º 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA	70
	ANEXO N.º 02: FICHA DE OBSERVACIÓN	71
	ANEXO N.º 03: BASE DE DATOS	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. Sistemas fotovoltaicos en zonas rurales	10
Figura 2. Tipos de paneles solares fotovoltaicos	30
Figura 3. Tipos de inversores fotovoltaicos	31
Figura 4. Tipos de estructuras de montaje	32
Figura 5. Tipos de sistemas de almacenamiento	32
Figura 6. Rendimiento energético por mes (kWh) sin rastreadores	45
Figura 7. Capacidad de almacenamiento (kWh) sin rastreadores.....	46
Figura 8. Vida útil del sistema fotovoltaico (años) sin rastreadores	47
Figura 9. Rendimiento energético por mes (kWh) con rastreadores	48
Figura 10. Capacidad de almacenamiento (kWh) con rastreadores	49
Figura 11. Vida útil del sistema fotovoltaico (años) con rastreadores	50
Figura 12. Comparando medias del rendimiento energético.....	51
Figura 13. Comparando medias de la capacidad de almacenamiento.....	52
Figura 14. Comparando medias de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos ..	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rastreadores solares de un solo eje	23
Tabla 2. Operacionalización de variables	37
Tabla 3. Estadísticos descriptivos del rendimiento energético sin rastreadores	45
Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la capacidad de almacenamiento sin rastreadores	46
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la vida útil del sistema fotovoltaico sin rastreadores	47
Tabla 6. Estadísticos descriptivos del rendimiento energético con rastreadores	48
Tabla 7. Estadísticos descriptivos de la capacidad de almacenamiento con rastreadores	49
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de la vida útil del sistema fotovoltaico con rastreadores	50
Tabla 9. Prueba T-Student para el rendimiento energético comparando con y sin rastreador solar	54
Tabla 10. Prueba T-Student para la eficiencia de conversión comparando con y sin rastreador solar	55
Tabla 11. Prueba T-Student para la autonomía y almacenamiento comparando con y sin rastreador solar	56
Tabla 12. Prueba T-Student para la sostenibilidad y durabilidad comparando con y sin rastreador solar	57

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CC: Corriente continua

CA: Corriente alterna

MPP: Punto de máxima potencia

kWh: kilovatios-hora

MW: Megavatios

Wh: vatio-hora

PV: Panel fotovoltaico

CSP: Concentración de energía solar

ROI: Retorno de la inversión

RESUMEN

Objetivo: Determinar de qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Metodología: La investigación es de tipo explicativa con un diseño cuasiexperimental y un enfoque cuantitativo. La población estuvo conformada por 65000 sistemas fotovoltaicos que existen en las zonas rurales del Perú de los cuales se determinó la muestra en 98 y que fueron instalados por el Ministerio de Energía y Minas.

Resultados: Al analizar el indicador de rendimiento energético por mes (kWh) con y sin rastreadores solares podemos ver que el rendimiento es mucho menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 7219.9 kWh y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 7968.2 kWh demostrando así que los rastreadores ayudan a tener un incremento en el rendimiento energético, al analizar el indicador de capacidad de almacenamiento (kWh) con y sin rastreadores solares podemos ver qué capacidad de almacenamiento es mucho menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 7735.6 kWh y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 8467.1 kWh demostrando así que los rastreadores ayudan a tener una capacidad de almacenamiento mucho mayor ya que se aprovecha de manera más eficiente la radiación solar, y al analizar el indicador de vida útil con y sin rastreadores solares podemos ver qué la vida útil es menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 22 años y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 24 años demostrando así que los rastreadores ayudan a incrementar la vida útil ligeramente ya que así como se incrementa la eficiencia también se tiene un desgaste ya que los paneles fotovoltaicos modifican la orientación e inclinación de los paneles para aprovechar la radiación solar.

Conclusiones: El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Palabras clave: rastreador, sistema fotovoltaico, energía solar.

ABSTRACT

Objective: Determine how the solar tracker improves the performance of photovoltaic systems in rural areas of Peru – 2024.

Methodology: The research is explanatory with a quasi-experimental design and a quantitative approach. The population was made up of 65,000 photovoltaic systems that exist in rural areas of Peru, of which the sample was determined to be 98 and which were installed by the Ministry of Energy and Mines.

Results: When analyzing the energy performance indicator per month (kWh) with and without solar trackers we can see that the performance is much lower in the case that there are no trackers, being an average of 7219.9 kWh and in the case of having trackers An average of 7968.2 kWh was obtained, thus demonstrating that the trackers help to have an increase in energy performance. By analyzing the storage capacity indicator (kWh) with and without solar trackers, we can see that the storage capacity is much lower in the case. that there are no trackers, an average of 7735.6 kWh and in the case of having trackers, an average of 8467.1 kWh was obtained, thus demonstrating that the trackers help to have a much greater storage capacity since the storage capacity is used more efficiently. solar radiation, and by analyzing the useful life indicator with and without solar trackers we can see that the useful life is lower in the case that there are no trackers, being an average of 22 years and in the case of having trackers, a average of 24 years, thus demonstrating that the trackers help to increase the useful life slightly since just as efficiency is increased, there is also wear and tear since the photovoltaic panels modify the orientation and inclination of the panels to take advantage of solar radiation.

Conclusions: The solar tracker improves the performance of photovoltaic systems in rural areas of Peru – 2024.

Keywords: tracker, photovoltaic system, solar energy.

INTRODUCCIÓN

En el año 2023, el acceso a una fuente de energía confiable y sostenible sigue siendo uno de los mayores desafíos en las zonas rurales del Perú. Estas comunidades remotas a menudo se enfrentan a dificultades para acceder a la red eléctrica tradicional, lo que limita sus oportunidades de desarrollo y calidad de vida. En respuesta a esta situación, la energía solar fotovoltaica ha surgido como una prometedora alternativa para abastecer de electricidad a estas áreas. Sin embargo, para maximizar el potencial de la energía solar en regiones con condiciones climáticas diversas y fluctuantes, es esencial explorar tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en entornos rurales.

En este contexto, los rastreadores solares se presentan como una solución vanguardista y eficiente para optimizar la generación de energía solar. La eficiencia de conversión, la autonomía y el almacenamiento, y la sostenibilidad y durabilidad son dimensiones cruciales en la evaluación de sistemas fotovoltaicos. Los rastreadores solares, que permiten el seguimiento preciso del movimiento del sol durante el día, se destacan por su capacidad de mejorar significativamente la eficiencia de conversión al maximizar la captación de radiación solar. Esta tecnología se integra a los sistemas fotovoltaicos para ajustar su orientación e inclinación de manera dinámica, asegurando así que los paneles solares estén siempre alineados con el sol, optimizando la captación de energía solar durante todo el día.

Determinar de qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

En el contexto mundial, la creciente demanda de energía y los desafíos asociados al cambio climático han impulsado la búsqueda de fuentes de energía más limpias y sostenibles. La energía solar fotovoltaica ha emergido como una solución prometedora, sin embargo, a pesar de sus ventajas, aún existen limitaciones en su eficiencia y rendimiento en diferentes regiones del mundo. La eficacia de la generación de energía solar puede verse afectada por la falta de tecnologías que optimicen la captación de radiación solar en condiciones climáticas cambiantes. Esta problemática obstaculiza el pleno aprovechamiento del potencial solar y la consecución de una transición energética global hacia una fuente más ecológica y accesible.

En el caso específico del Perú, país caracterizado por su diversidad geográfica, social y económica, la situación energética presenta desafíos significativos. Si bien el Perú cuenta con un alto potencial de recursos solares, especialmente en sus regiones rurales, estas áreas enfrentan dificultades para acceder a una energía eléctrica confiable y sostenible debido a su lejanía y la falta de infraestructuras energéticas adecuadas. Los sistemas fotovoltaicos han sido implementados como una alternativa para abastecer de electricidad a estas comunidades, pero la eficiencia de conversión y la generación constante de energía aún son aspectos que requieren mejoras. La falta de tecnologías como los rastreadores solares, que optimicen el rendimiento de estos sistemas fotovoltaicos, limita el progreso hacia un suministro energético más estable y sostenible, afectando el desarrollo y bienestar de las comunidades rurales en el país.

En las zonas rurales del Perú, donde la electrificación tradicional es escasa o inexistente, la implementación de sistemas fotovoltaicos representa una esperanza para satisfacer las necesidades energéticas básicas y promover el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, la variabilidad climática y la falta de tecnologías que optimicen la captación de la energía solar pueden reducir la

eficiencia de estos sistemas, lo que impacta negativamente en la generación y disponibilidad de electricidad en estas comunidades. Los rastreadores solares, al permitir un seguimiento preciso del sol, ofrecen una solución viable para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en estas áreas rurales, aumentando la eficiencia de conversión y extendiendo la autonomía energética. La falta de acceso a tecnologías de seguimiento solar puede representar un obstáculo para el acceso a una energía confiable y sostenible, limitando el progreso y bienestar de las poblaciones rurales en el Perú. Por lo tanto, es imperativo abordar esta problemática y evaluar el impacto de los rastreadores solares como una solución eficiente y accesible para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en estas áreas remotas.



Figura 1. Sistemas fotovoltaicos en zonas rurales

1.2. Formulación del problema

Problema general

¿De qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?

Problemas específicos

- ¿De qué manera la eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?

- ¿De qué manera la capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?
- ¿De qué manera la orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?

1.3. Objetivos

Objetivo general

Determinar de qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Objetivos específicos

- Determinar de qué manera la eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.
- Determinar de qué manera la capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.
- Determinar de qué manera la orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación económica

Se justifica económicamente debido a su capacidad para aumentar la eficiencia de conversión de la radiación solar en electricidad utilizable. Al optimizar la captación de energía solar durante todo el día, los rastreadores solares permiten una generación eléctrica más constante y elevada, maximizando así el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles. Esta mejora en la eficiencia se traduce en un aumento significativo de la producción de energía, lo que reduciría la dependencia de combustibles fósiles y, en última instancia,

disminuiría los costos a largo plazo asociados a la compra y transporte de combustibles tradicionales en regiones rurales remotas. Además, al potenciar la autonomía energética y la disponibilidad constante de electricidad, se impulsaría el desarrollo económico y social de estas comunidades, permitiendo la implementación de proyectos productivos, educativos y de salud, lo que contribuiría a una mejora integral de la calidad de vida de los habitantes en las zonas rurales del Perú.

1.4.2. Justificación práctica

La justificación práctica radica en su capacidad para optimizar la generación de energía solar y maximizar el rendimiento de los sistemas. Al seguir con precisión el movimiento del sol durante el día, los rastreadores solares permiten una captación más eficiente de la radiación solar, lo que se traduce en un aumento significativo de la producción eléctrica. Esta mejora práctica en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos aseguraría un suministro eléctrico más constante y confiable, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y mejorando la calidad de vida de las comunidades rurales. La utilización de esta tecnología práctica se convertiría en un factor clave para el desarrollo sostenible y el progreso económico en estas áreas, garantizando una fuente de energía limpia y asequible que beneficiaría a toda la población en el Perú rural.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Delimitante teórica

La delimitante teórica se enfocará en la aplicación específica de rastreadores solares en sistemas fotovoltaicos, limitando la investigación al análisis de su efectividad en el contexto de las zonas rurales del Perú. Se abordarán aspectos relacionados con la eficiencia de conversión, la autonomía y almacenamiento, y la sostenibilidad y durabilidad de los rastreadores solares, así como su impacto en la mejora del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en dichas áreas rurales. La investigación se centrará en evaluaciones cuantitativas y cualitativas, teniendo en cuenta las características climáticas y geográficas específicas de las zonas rurales del Perú, con el fin de obtener conclusiones pertinentes y aplicables para el desarrollo de soluciones energéticas eficientes y sostenibles.

1.5.2. Delimitante temporal

La delimitante temporal para el estudio se establece en un período de seis meses, con inicio en abril de 2024 y finalización en setiembre de 2024. Durante este lapso, se llevarán a cabo todas las etapas de investigación, desde la recolección de datos hasta el análisis de resultados y conclusiones. La delimitación temporal garantiza una adecuada planificación y ejecución del estudio, permitiendo obtener resultados relevantes y actualizados para comprender el impacto y la viabilidad de los rastreadores solares en el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú.

1.5.3. Delimitante espacial

La delimitante espacial se enfoca en las áreas rurales del territorio peruano. El estudio se llevará a cabo en diversas comunidades rurales seleccionadas de diferentes regiones geográficas del país, abarcando zonas con condiciones climáticas y geográficas variadas. La investigación se centrará en la aplicación y análisis de rastreadores solares en sistemas fotovoltaicos específicamente en estas áreas rurales, con el fin de obtener conclusiones y recomendaciones pertinentes para el mejoramiento de la eficiencia energética y el desarrollo sostenible en dichas zonas del Perú.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación realizada por Carbajal y cols. en el 2020 la cual titula “Rastreador solar difuso para mejorar la obtención de energía eléctrica en paneles solares” y plantea como objetivo determinar la mejora de obtención de energía solar eléctrica empleando un rastreador solar con control basado en lógica difusa, en la ciudad de Pampas Tayacaja. La metodología empleada se basó en el diseño experimental de un rastreador solar con programación de un algoritmo en el microcontrolador. Los resultados fueron que las potencias generadas por el panel fotovoltaico con seguidor solar difuso son consideradas muestras del grupo experimental y las potencias obtenidas por el panel fotovoltaico con posición fija representa las muestras del grupo control. Estas muestras se sometieron a prueba t de Student para muestras emparejadas a ambas colas para un nivel de confianza del 95% y nivel de significación de $\alpha=0.05$. Se concluyó que a partir de los resultados del análisis de las muestras para una significancia de $\alpha=0.05$ y un valor-p = 0.006 que es menor que la significancia, se acepta que los promedios de las potencias eléctricas obtenidas en los paneles fotovoltaicos con rastreador solar difuso y el panel fotovoltaico con posición fija son estadísticamente diferentes. Esta diferencia es de aproximadamente 10.10 W, el cual significa una mejora en la obtención de energía eléctrica alrededor de 25.28 %.[1]

En la investigación realizada por Nieto y Ramos en el 2021 la cual titula “Implementación de un módulo para el análisis de la trayectoria solar en paneles fotovoltaicos”, planteó como objetivo realizar el diseño e implementación de un módulo para el complemento en el análisis del ángulo óptimo y del mapa de trayectoria por sombreados en un sistema fotovoltaico para aplicaciones de energía solar. El tipo de investigación es de campo. Los resultados fueron que mediante ecuaciones matemáticas se logró determinar la inclinación óptima de 5.23° , también se tomó valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto del módulo de 30W, el mejor valor corriente se obtuvo a los 5° , para

valores de voltaje de mantenía prácticamente estable desde los 0 hasta los 30°, para comprobar los resultados obtenidos se llevó el análisis a un software de dimensionamiento que se pueda modificar los parámetros de inclinación y orientación, para los ángulos comprendidos entre 0 y 90° no se tiene error por ángulo óptimo sin embargo para 5° se tiene una mayor cantidad de irradiación solar. Se concluyó que los módulos fotovoltaicos con paneles solares abastecen de energía constante y estable.[2]

En la investigación realizada por Riccio en el 2022 la cual titula “Seguidor solar a dos ejes cuya posición se calcula utilizando los ángulos de elevación y Azimut del sol en Guayaquil” propuso una alternativa al uso de seguidores solares que buscan el punto de máxima potencia. En lugar de esto, su enfoque se basó en un algoritmo que ajusta activamente la posición del panel solar. La investigación fue de naturaleza aplicada y analítica, empleando un diseño cuasi experimental. Los resultados mostraron que un seguidor solar que ajusta su posición de manera predefinida según la ubicación del sol durante el día puede ser efectivo. Para ello, es necesario calcular dos ángulos: el azimut y el ángulo de elevación solar. El algoritmo proporciona estos ángulos, donde la elevación se mide en grados desde el suelo y el azimut de 0° a 360° desde el este hacia el norte. Estos ángulos determinan la posición del seguidor solar en cualquier día del año. Sin embargo, se observaron limitaciones mecánicas en cuanto a los ángulos máximos y mínimos que el seguidor puede alcanzar. En conclusión, se logró desarrollar un método para determinar el posicionamiento de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar en Guayaquil, Ecuador. Este sistema utiliza como datos de entrada únicamente la ubicación geográfica (latitud y longitud en grados), el año, y el periodo de tiempo para calcular los ángulos solares a lo largo del día.[3]

En la investigación realizada por Padilla, Chamba, Sarango y Jiménez en el 2022 la cual titula “Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para Aumentar el Rendimiento de Generación”, el objetivo del estudio fue diseñar y desarrollar un prototipo de seguidor solar para mejorar el rendimiento en la generación de energía. La metodología utilizada fue aplicada y tecnológica, con un diseño experimental. Los resultados mostraron que el seguidor solar mejoró la eficiencia

del tiempo de carga de la batería en un 20% en comparación con un panel solar estático. Además, el prototipo pudo proporcionar dos horas de uso continuo con una carga constante de 200W. El sistema seguidor respondió en 20 segundos ante cualquier cambio en la dirección o intensidad del sol. Este seguidor solar demostró ser más eficiente en la captación de energía, ya que permite una mayor intensidad e incidencia de luz solar sobre la superficie del panel, lo que resulta en un mayor voltaje y corriente, facilitando así el funcionamiento en el punto de máxima potencia y una carga más rápida de las baterías, las cuales suministran energía al inversor del sistema. En conclusión, el uso de un controlador lógico programable con entradas analógicas para gestionar un seguidor solar añade un mayor grado de robustez al sistema y permite una programación adaptable a las necesidades de la instalación y al número de actuadores utilizados.[4]

En la investigación realizada por Tovar en el 2020 la cual titula “Diseño e implementación de un sistema de tracking solar en dos ejes para la ciudad de Bogotá”, el objetivo del estudio fue diseñar e implementar un sistema fotovoltaico de seguimiento solar a dos ejes con mediciones en tiempo real en la ciudad de Bogotá, con el fin de evaluar su viabilidad energética. La metodología empleada fue aplicada y tecnológica, utilizando un diseño experimental. Durante la investigación, se enfrentaron dificultades significativas, como la imposibilidad de adquirir dos paneles con la misma potencia nominal y otros materiales necesarios debido a las restricciones impuestas por la pandemia de COVID-19. A pesar de estos obstáculos, el proyecto fue exitoso, logrando ensamblar el dispositivo, realizar las mediciones y analizarlas. El costo total del proyecto fue de \$616,400 pesos colombianos, cumpliendo con el presupuesto máximo de \$700,000 pesos. Se concluyó que los costos operativos son bajos porque el Arduino de control fue programado para encenderse solo cuando realiza una medición, permaneciendo activo por solo 3 segundos, lo que ahorra energía. En términos de generación de energía, el dispositivo sin seguimiento produjo 8.24 Wh, 8.13 Wh y 8.02 Wh en los días de medición, mientras que el dispositivo con seguimiento a dos ejes generó 9.74 Wh, 10.1 Wh y 10 Wh respectivamente. La ganancia de implementar el sistema de seguimiento solar fue del 15%, 20% y 26% en los días de medición, con porcentajes de eficiencia que se encuentran

dentro o cerca del rango estipulado del 20% al 40%, cumpliendo así el objetivo inicial del estudio.[5]

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación realizada por Parrilla y Prieto en el 2023 la cual titula “Factibilidad energética y económica de sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con seguidor solar para un cliente industrial en la región de Piura” planteó como objetivo realizar la simulación mediante el software PVSyst de los dos tipos de sistema de montaje, permitiendo comparar la producción energética estimada entre el sistema fotovoltaico en estructura fija y el sistema fotovoltaico con seguidor solar. El tipo de investigación fue descriptivo. Los resultados fueron que para el caso de sistema fotovoltaico con seguidor, los fabricantes de este tipo de estructuras comercializan para sistemas fotovoltaicos a partir de 200 kW; en caso la demanda sea menor a la cantidad mínima de venta, el precio no varía, el sistema fotovoltaico conectado a red montado en estructura seguidor, pese a tener un retorno de inversión de, aproximadamente, 10 años, siendo este período menor al tiempo de vida útil del sistema, presenta menor energía producida (22.973 MWh) respecto a su contraparte de estructura fija (32.223 MWh y 2 años de retorno de inversión). Se concluyó que, en relación con la metodología de cálculo empleada, considerando como punto de partida el consumo eléctrico del cliente, esta viene sujeto a la potencia que el cliente ha contratado, puesto que la potencia del inversor siempre debe ser menor que la potencia contratada.[6]

En la investigación realizada por Vidal en el 2022 la cual titula “diseño de seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos” planteó como objetivo diseñar el seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos. La metodología de la investigación fue de tipo tecnológica, con un diseño experimental. Los resultados fueron que para el ángulo de inclinación del panel se utilizó la teoría de ángulos astronómicos el cual indica que se puede utilizar los mismos grados que la latitud del lugar, para nuestro caso se tiene una Latitud de -12.03534, entonces el panel tiene una inclinación de 12 grados. El coeficiente de rendimiento (PR,

Performance Ratio) de un sistema fotovoltaico es la relación entre la producción real de un sistema fotovoltaico y la irradiación solar recibida in situ, y se utiliza para evaluar la calidad del sistema en un sistema estático se alcanza un valor de 66.3%. La fracción solar se mejora con respecto a una instalación estática alcanzando valores de 0.605 es decir se aprovecha el 60.5% de energía a través de un panel solar. El coeficiente de rendimiento del sistema tiene un valor de 52.8 %. Se concluyó que el diseño del seguidor solar por medio de sensor de radiación incrementa la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos en un 26.56 % en promedio.[7]

En la investigación realizada por Vidal en el 2022 la cual titula "Diseño de seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos" el objetivo del estudio fue diseñar un seguidor solar utilizando un sensor de radiación para aumentar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos. La metodología empleada fue de tipo tecnológica, con un nivel experimental y un enfoque sistémico. Los resultados mostraron que para el diseño del seguidor solar se utilizó el software PVSyst, en el cual se simuló un sistema fotovoltaico estático y otro con un seguidor solar equipado con un sensor. Para el estudio, se asumió una carga mínima de 100 vatios, estimando que esta es la potencia necesaria para el motor del seguidor. Se utilizó la teoría de ángulos astronómicos para determinar el ángulo de inclinación del panel, aplicando los mismos grados que la latitud del lugar, que en este caso es -12.03534 , resultando en una inclinación de 12 grados. Se concluyó que el diseño del seguidor solar con sensor de radiación aumentó la producción de energía eléctrica en los módulos fotovoltaicos en un promedio del 26.56%. La potencia de salida del sistema fotovoltaico incrementó en un rango de 250 a 300 vatios. Para el sistema con seguidor, la generación de energía se situó entre 1.7 y 2.3 kWh por día. La fracción solar mejoró en comparación con una instalación estática, alcanzando un valor de 0.605, lo que significa que se aprovechó el 60.5% de la energía solar. La temperatura del sistema fotovoltaico en funcionamiento llegó a 70 °C con valores de irradiación de 1200 W/m², concluyéndose que la irradiación es directamente proporcional a la temperatura.[8]

En la investigación realizada por Mendoza, Aquino y Lindo en el 2024 la cual titula “Análisis de paneles fotovoltaicos en entornos de operación reales para determinar su eficiencia”, el estudio tuvo como objetivo proporcionar correlaciones semi empíricas derivadas de datos externos y comprender los diversos factores climáticos que afectan el rendimiento de los generadores fotovoltaicos. La metodología fue analítica y explicativa, utilizando un diseño no experimental. Los resultados mostraron que el modelo de eficiencia desarrollado considera tres variables independientes: temperatura de la celda, irradiancia solar y masa de aire relativa. Estas variables se emplean para calcular los rendimientos de los módulos fotovoltaicos. Las características de corriente/voltaje (I/V) del módulo seleccionado se utilizaron como base para obtener los parámetros del modelo, y estas mediciones se realizaron al aire libre en condiciones reales de funcionamiento. El modelo permite determinar las eficiencias de la celda y del módulo en todas las situaciones operativas relevantes. Se realizaron cálculos de rendimiento para cinco módulos comerciales en una ubicación con buena irradiación en Jordania, donde se disponía de datos meteorológicos fiables. Se concluyó que se utilizó el modelo general de Durisch para determinar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, proporcionando un cálculo preciso de la eficiencia en condiciones climáticas variables. El estudio reveló que el modelo puede aplicarse a módulos fotovoltaicos fabricados con diferentes materiales semiconductores.[9]

En la investigación realizada por Pérez en el 2021 la cual titula “Diseño del colector solar térmico de un sistema híbrido PVT por modelamiento y simulación” el estudio tuvo como objetivo diseñar un colector solar térmico para un sistema híbrido PVT (fotovoltaico-térmico) mediante modelamiento y simulación. La metodología fue explicativa y se basó en un diseño experimental. Los resultados mostraron que, a través de la formulación de un modelo matemático dinámico y simulación, se diseñó un colector solar térmico para un sistema híbrido PVT, que puede ser utilizado en áreas sin conexión a la red eléctrica. El colector plano fue diseñado con tubos de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, entre 6 y 8 tubos, y una placa absorbente de acero. La capacidad y características del sistema afectan la temperatura de sus componentes y, en consecuencia, su eficiencia eléctrica y térmica. La

diferencia entre las mediciones y las estimaciones del modelo matemático para la temperatura del panel fotovoltaico, el promedio del agua del colector y la temperatura del absorbedor fue de -0.4778 , 1.2807 y 0.1664 °C, respectivamente. Además, utilizando los indicadores ER, EA, MEF, CD, C y RMSD para probar hipótesis sobre estas tres temperaturas, el modelo matemático predijo de manera precisa la temperatura del panel fotovoltaico y el promedio del agua del colector, aunque no fue tan exacto para la temperatura del absorbedor. Se concluyó que el modelo matemático desarrollado puede estimar la temperatura del panel fotovoltaico, el promedio del agua que entra y sale del colector, y la del absorbedor. Para ello, se realizaron tres balances de energía que consideraron la irradiancia solar, la energía eléctrica generada y las pérdidas de calor por convección y radiación en las diferentes partes del sistema. El modelo no es excesivamente complejo, lo que lo hace adecuado para su uso práctico.[10]

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Rastreador solar

Como menciona Soares y sus cols. en el 2022 mencionan que un rastreador solar para sistemas fotovoltaicos es un dispositivo automatizado que sigue el movimiento del sol a lo largo del día y ajusta la posición de los paneles solares en consecuencia. Su objetivo es maximizar la eficiencia de generación de energía al mantener los paneles siempre orientados hacia el sol en el ángulo óptimo. Al adaptarse a la trayectoria solar, estos rastreadores permiten una mayor captación de luz solar durante más horas, lo que resulta en una mayor producción de electricidad y una mejora significativa en la rentabilidad y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.[11]

Según Tarazona y sus cols. en el 2022, un rastreador solar es un mecanismo inteligente diseñado para seguir la posición del sol a lo largo del día y ajustar la orientación de los paneles solares o espejos reflectantes en consecuencia. Al mantener un ángulo óptimo de incidencia de la luz solar, los rastreadores solares permiten una captación más eficiente de la energía solar, lo que se traduce en un aumento significativo de la producción de electricidad o calor en sistemas

fotovoltaicos o termosolares. Estos dispositivos optimizan el rendimiento de las instalaciones solares al maximizar la cantidad de energía capturada durante todo el día, contribuyendo así a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.[12]

Funcionamiento

El principio de funcionamiento de los rastreadores solares se basa en la capacidad de estos dispositivos para orientar continuamente los paneles solares hacia el sol, optimizando así la captación de la energía solar a lo largo del día y de las estaciones. A continuación, se detallan los componentes y mecanismos clave que permiten este funcionamiento:

- **Sensores de Luz Solar:** Los rastreadores solares utilizan sensores de luz solar, comúnmente llamados fotodetectores, para determinar la posición del sol en el cielo. Estos sensores detectan la intensidad de la luz solar en diferentes direcciones, lo que permite al sistema calcular la mejor orientación para los paneles solares.
- **Controladores Electrónicos:** Los datos recogidos por los sensores de luz solar son enviados a un controlador electrónico. Este controlador procesa la información y genera las señales necesarias para ajustar la posición de los paneles solares. Los controladores modernos pueden ser programados para seguir trayectorias solares predefinidas o adaptarse dinámicamente a las condiciones de luz actuales.
- **Sistemas de Movimiento:** Para ajustar la orientación de los paneles solares, los rastreadores están equipados con sistemas de movimiento, que incluyen motores y actuadores. Dependiendo del tipo de rastreador, estos sistemas pueden ser:
 - **Eje Simple:** En los rastreadores de un solo eje, el sistema de movimiento permite la rotación de los paneles solares en una dirección, generalmente de este a oeste, siguiendo el movimiento diario del sol.

- Doble Eje: Los rastreadores de doble eje permiten la rotación en dos direcciones, lo que permite seguir tanto el movimiento diario del sol como el cambio estacional en su altura en el cielo.
- Algoritmos de Seguimiento: Los controladores electrónicos emplean algoritmos de seguimiento para calcular la posición óptima del sol en cualquier momento. Estos algoritmos pueden ser de dos tipos:
 - Seguimiento Activo: Utiliza datos en tiempo real de los sensores de luz solar para ajustar la orientación de los paneles de manera continua.
 - Seguimiento Pasivo: Se basa en modelos matemáticos predefinidos de la trayectoria solar para ajustar la posición de los paneles según un horario preestablecido.
- Mecanismos de Retroalimentación: Para asegurar la precisión y eficacia del seguimiento, los rastreadores solares pueden incluir mecanismos de retroalimentación que monitorean la posición de los paneles y ajustan cualquier desalineación que pueda ocurrir debido a factores como el viento o el desgaste mecánico. Estos sistemas de retroalimentación garantizan que los paneles permanezcan en la orientación óptima en todo momento.

Tipos de rastreadores solares

Existen varios tipos de rastreadores solares, cada uno diseñado para optimizar la captación de energía solar en diferentes condiciones y aplicaciones. Los dos tipos principales son los rastreadores de un solo eje y los de doble eje, pero también hay variaciones dentro de estas categorías. A continuación, se detallan los tipos más comunes de rastreadores solares:

- Rastreadores de un solo eje
 - Tenemos 3 tipos de rastreadores solares que se manejan con un solo eje.

Tabla 1. Rastreadores solares de un solo eje

Rastreadores de un solo eje	Funcionamiento	Aplicaciones	Ventajas
Horizontales de Un Solo Eje	Estos rastreadores se mueven a lo largo de un eje horizontal, generalmente de este a oeste, siguiendo el movimiento diario del sol.	Son adecuados para áreas con mucha luz solar directa y pocas obstrucciones en el horizonte.	Son menos costosos y más simples de instalar y mantener que los rastreadores de doble eje
Verticales de Un Solo Eje	Estos rastreadores se mueven a lo largo de un eje vertical, ajustando la inclinación de los paneles solares.	Utilizados en instalaciones donde la variación en la altitud del sol es más relevante que su movimiento horizontal, como en latitudes extremas.	Mejor adaptación a terrenos con inclinaciones y espacios reducidos.
Inclinados de Un Solo Eje	Estos rastreadores combinan la rotación horizontal y vertical, ajustando los paneles a lo largo de un eje inclinado.	Ideales para terrenos inclinados y áreas con sombra parcial, donde la orientación óptima requiere ajustes en ambos planos.	Ofrecen un equilibrio entre eficiencia y costos en comparación con los sistemas de doble eje.

Fuente: Elaboración propia del autor

- Rastreadores de doble eje

Funcionamiento: Estos rastreadores permiten el movimiento en dos ejes perpendiculares entre sí, lo que permite ajustar la orientación de los paneles solares en ambos planos, horizontal y vertical. Esto les permite

seguir el sol de este a oeste durante el día y ajustarse a la altura del sol en el cielo a lo largo del año.

Aplicaciones: Son ideales para maximizar la captación de energía en áreas con alta variabilidad en la posición solar, como en instalaciones de concentración solar (CSP) y sistemas fotovoltaicos de alta eficiencia.

Ventajas: Proporcionan la mayor captación de energía posible al mantener una orientación óptima en todo momento, resultando en incrementos de producción de hasta un 40% en comparación con los sistemas fijos.

Desventajas: Son más complejos y costosos de instalar y mantener debido a la necesidad de componentes adicionales y su mayor susceptibilidad al desgaste mecánico.

- Rastreadores pasivos

Funcionamiento: Utilizan materiales sensibles al calor para ajustar la orientación de los paneles solares. Estos materiales se expanden o contraen con la temperatura, provocando el movimiento del rastreador.

Aplicaciones: Son adecuados para instalaciones pequeñas y medianas donde se busca una solución de bajo costo y mantenimiento.

Ventajas: No requieren energía eléctrica para funcionar y tienen un diseño más simple.

Desventajas: Menos precisos que los rastreadores activos, ya que su movimiento depende de las variaciones de temperatura.

- Rastreadores híbridos

Funcionamiento: Combinan características de los rastreadores activos y pasivos, utilizando sensores y controladores electrónicos junto con mecanismos de ajuste térmico.

Aplicaciones: Se utilizan en instalaciones donde se busca optimizar la captación de energía con un equilibrio entre costo y rendimiento.

Ventajas: Ofrecen un buen rendimiento con costos moderados y menor complejidad que los sistemas totalmente activos.

Desventajas: Su rendimiento puede no ser tan alto como el de los rastreadores de doble eje completamente activos, pero son más eficientes que los pasivos.

Beneficios en la captación de energía de los rastreadores solares

Los rastreadores solares ofrecen numerosos beneficios en la captación de energía, que se traducen en una mayor eficiencia y rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. A continuación, se describen los principales beneficios:

- **Mayor Captación de Energía:** Los rastreadores solares permiten que los paneles fotovoltaicos sigan la trayectoria del sol a lo largo del día, manteniéndose orientados de manera óptima para maximizar la captación de la radiación solar directa. Esto se traduce en un aumento significativo de la producción de energía en comparación con los paneles fijos.

Incremento en la Producción: En general, los rastreadores de un solo eje pueden aumentar la producción de energía entre un 20% y un 30%, mientras que los rastreadores de doble eje pueden incrementar la producción hasta en un 40%.

Eficiencia Mejorada: Al optimizar el ángulo de incidencia de la luz solar, se reduce la pérdida de energía que ocurre cuando los paneles no están orientados directamente hacia el sol.

- **Optimización del Rendimiento Diario y Estacional:** Los rastreadores solares aseguran que los paneles estén orientados adecuadamente no solo durante el transcurso del día, sino también a lo largo de las diferentes estaciones del año, ajustándose a las variaciones en la altura del sol en el cielo.

Seguimiento Diurno: Los rastreadores ajustan la posición de los paneles desde el amanecer hasta el atardecer, maximizando la captación de energía durante todo el día.

Ajuste Estacional: Los rastreadores de doble eje permiten ajustes en la inclinación de los paneles para adaptarse a los cambios en la posición del sol entre el verano y el invierno, asegurando una captación óptima de energía durante todo el año.

- **Mejor Rendimiento en Condiciones de Baja Irradiancia:** Los rastreadores solares son particularmente efectivos en mejorar la captación de energía en condiciones de baja irradiancia, como días parcialmente nublados o en regiones con alta latitud donde el sol tiene un ángulo más bajo durante el invierno.

Aprovechamiento de la Luz Difusa: Aunque los rastreadores son más efectivos con la luz solar directa, también pueden mejorar la captación de la luz solar difusa que penetra las nubes, aumentando así la producción total de energía.

Mayor Consistencia: Al mantener una orientación óptima, los rastreadores pueden reducir las fluctuaciones en la producción de energía debidas a cambios en las condiciones meteorológicas.

- **Aprovechamiento Óptimo del Espacio:** En instalaciones solares a gran escala, como las granjas solares, el uso de rastreadores puede maximizar el uso del espacio disponible, incrementando la densidad de producción de energía por unidad de área.

Distribución Uniforme: Los rastreadores permiten una distribución más uniforme de la captación de energía, lo que puede resultar en un diseño más eficiente y compacto de la instalación.

Reducción de Sombra: Al ajustar la posición de los paneles, los rastreadores pueden minimizar las sombras proyectadas entre filas de paneles, optimizando el uso del terreno.

- **Beneficios Económicos:** El aumento en la producción de energía resultante del uso de rastreadores solares puede traducirse en beneficios económicos significativos, tanto en términos de reducción de costos operativos como de maximización de ingresos.

Mejor Retorno de Inversión (ROI): A pesar de los mayores costos iniciales y de mantenimiento, el incremento en la producción de energía puede resultar en un retorno de inversión favorable a largo plazo.

Reducción de Costos de Energía: En instalaciones comerciales e industriales, el uso de rastreadores solares puede reducir

significativamente los costos de energía, aumentando la competitividad y sostenibilidad económica de la empresa.

Factores ambientales y de ubicación

Al considerar la implementación de rastreadores solares, es crucial evaluar varios factores ambientales y de ubicación que pueden influir en su rendimiento y viabilidad. A continuación, se detallan estos factores:

- **Condiciones Climáticas:** Las condiciones climáticas de una ubicación específica pueden tener un impacto significativo en la eficiencia y el rendimiento de los rastreadores solares.

Irradiación Solar: Las áreas con alta irradiación solar son ideales para la instalación de rastreadores solares, ya que la mayor cantidad de luz solar directa aumenta la producción de energía.

Nubosidad y Precipitaciones: En regiones con alta nubosidad o frecuentes precipitaciones, el rendimiento de los rastreadores puede verse afectado, aunque los sistemas de seguimiento pueden mejorar la captación de luz difusa en comparación con los paneles fijos.

Temperatura y Humedad: Las temperaturas extremas y la alta humedad pueden afectar la durabilidad y el mantenimiento de los rastreadores solares, por lo que es esencial considerar la resistencia de los materiales y componentes utilizados.

- **Terreno y Topografía:** La naturaleza del terreno y la topografía del sitio de instalación también influyen en la elección y rendimiento de los rastreadores solares.

Terreno Plano: Los rastreadores solares, especialmente los de doble eje, requieren un terreno relativamente plano para operar de manera óptima. En terrenos inclinados, los rastreadores de un solo eje con ajuste adecuado pueden ser más prácticos.

Obstrucciones: La presencia de obstrucciones como edificios, árboles o montañas puede causar sombras que afecten la eficiencia de los rastreadores. Es crucial realizar un análisis de sombras para determinar la mejor ubicación y configuración de los rastreadores.

Estabilidad del Suelo: El tipo de suelo y su estabilidad son importantes para la instalación de los soportes de los rastreadores. Suelos inestables o con alta erosión pueden requerir sistemas de anclaje especiales.

- Orientación y Latitud: La latitud y la orientación del sitio de instalación afectan directamente el diseño y la eficiencia de los sistemas de seguimiento solar.

Latitud: En latitudes más altas, la variación estacional de la altura del sol es más pronunciada, lo que hace que los rastreadores de doble eje sean más beneficiosos. En latitudes más cercanas al ecuador, los rastreadores de un solo eje pueden ser suficientes.

Orientación: La orientación ideal para los paneles solares es hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur. Los rastreadores permiten ajustes precisos en la orientación, optimizando la captación de energía.

- Viento y Condiciones Meteorológicas Extremas: Las condiciones de viento y eventos meteorológicos extremos pueden afectar la operación y durabilidad de los rastreadores solares.

Velocidades del Viento: Los rastreadores solares deben diseñarse para resistir las velocidades máximas del viento en la región. Los sistemas deben contar con mecanismos de seguridad para posicionar los paneles en un ángulo seguro durante tormentas o vientos fuertes.

Eventos Meteorológicos Extremos: Condiciones como tormentas de granizo, nevadas intensas o huracanes pueden dañar los rastreadores solares. Es fundamental considerar estas condiciones en el diseño y selección de materiales resistentes.

- Accesibilidad y Mantenimiento: La ubicación del sitio también debe considerarse en términos de accesibilidad para la instalación y mantenimiento de los rastreadores solares.

Acceso a Infraestructura: La proximidad a carreteras, líneas eléctricas y otras infraestructuras facilita la instalación y reduce los costos de logística.

Facilidad de Mantenimiento: Las áreas de difícil acceso pueden aumentar los costos y la complejidad del mantenimiento regular necesario para asegurar el óptimo funcionamiento de los rastreadores.

2.2.2. Sistema fotovoltaico

Como menciona Nuñez y sus cols. en el 2020, los sistemas fotovoltaicos son sistemas de generación de energía que convierten la luz solar directamente en electricidad utilizando células fotovoltaicas. Estas células, generalmente fabricadas a partir de silicio u otros materiales semiconductores, absorben la radiación solar y liberan electrones que generan una corriente eléctrica. Los paneles solares, que constan de múltiples células fotovoltaicas interconectadas, capturan la energía solar y la transforman en una forma de electricidad utilizable. Estos sistemas pueden variar en tamaño y escala, desde pequeños paneles solares residenciales hasta grandes instalaciones solares comerciales y de servicios públicos.[13]

Según Navarrete en el 2019, los sistemas fotovoltaicos son una tecnología de energía renovable clave que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al avance hacia un futuro más sostenible y ecológico. Al aprovechar una fuente inagotable y limpia de energía, como lo es la luz solar, estos sistemas disminuyen la dependencia de los combustibles fósiles y ayudan a mitigar el cambio climático. Además de los beneficios ambientales, los sistemas fotovoltaicos también ofrecen ventajas económicas, como el ahorro en costos de energía a lo largo del tiempo y la creación de empleos en la industria de energía renovable. Con un potencial significativo para la expansión global, los sistemas fotovoltaicos desempeñan un papel fundamental en la transición hacia una matriz energética más sostenible y resiliente.[14]

Componentes del sistema fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos son conjuntos de dispositivos que permiten la conversión de la energía solar en energía eléctrica utilizable. A continuación, se detallan los componentes principales que constituyen un sistema fotovoltaico:

- Paneles Solares Fotovoltaicos: Los paneles solares, también conocidos como módulos fotovoltaicos, son la parte central del sistema. Están compuestos por células solares que convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Existen 3 tipos:
 - Monocristalinos: Ofrecen alta eficiencia y una vida útil prolongada. Son fabricados a partir de un único cristal de silicio.
 - Policristalinos: Menos eficientes que los monocristalinos, pero más económicos. Están hechos de fragmentos de silicio fundidos juntos.
 - De capa fina: Utilizan menos material semiconductor, lo que los hace más ligeros y flexibles, aunque suelen ser menos eficientes.

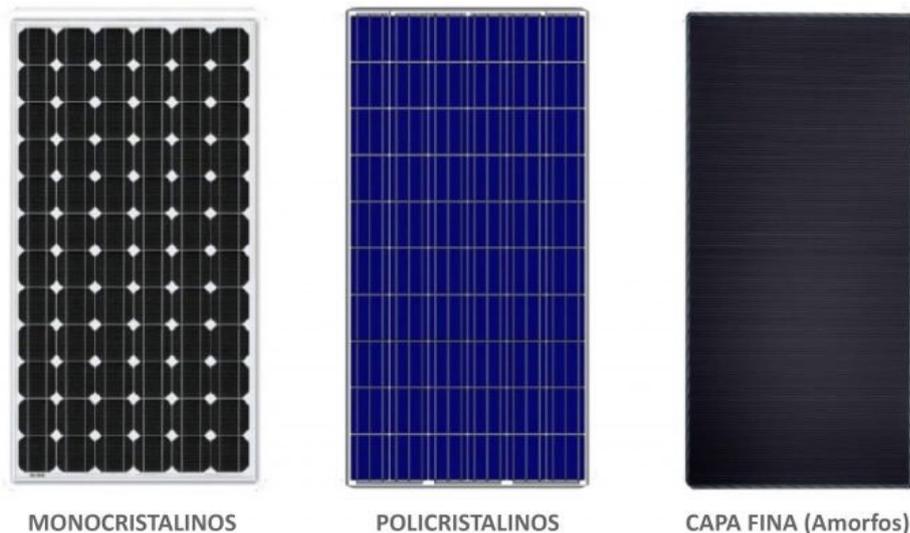


Figura 2. Tipos de paneles solares fotovoltaicos

- Inversor Fotovoltaico: El inversor es un componente crucial que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC), que es la forma de electricidad utilizada en la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales. Existen 3 tipos:
 - Inversores de cadena: Conectan múltiples paneles en serie. Son comunes en instalaciones residenciales.
 - Inversores centrales: Utilizados en grandes instalaciones, convierten la energía de un conjunto de cadenas de paneles.

- Microinversores: Instalados en cada panel individual, optimizan la producción de energía de cada módulo, reduciendo las pérdidas debidas a sombras o fallos en los paneles.



Figura 3. Tipos de inversores fotovoltaicos

- Estructura de Montaje: La estructura de montaje sostiene y orienta los paneles solares para maximizar la exposición solar y asegurar la estabilidad y seguridad del sistema. Existen 3 tipos:
 - Montaje en el suelo: Permite ajustes de inclinación y orientación para optimizar la captación de energía solar.
 - Montaje en techos: Común en aplicaciones residenciales y comerciales, se instala directamente sobre la superficie del techo.
 - Estructuras seguidoras (trackers): Siguen la trayectoria del sol a lo largo del día para maximizar la captación de energía.



Figura 4. Tipos de estructuras de montaje

- Sistema de Almacenamiento: Las baterías permiten almacenar la energía generada por los paneles solares para su uso posterior, especialmente útil durante la noche o en días nublados. Existen 3 tipos:
 - Baterías de plomo-ácido: Tradicionales y económicas, pero tienen menor vida útil y eficiencia.
 - Baterías de iones de litio: Más eficientes y con mayor densidad energética, aunque más costosas.
 - Baterías de flujo: Adecuadas para aplicaciones de gran escala debido a su capacidad de almacenamiento y vida útil prolongada.



Figura 5. Tipos de sistemas de almacenamiento

- Medidor y Sistema de Monitoreo: Estos dispositivos permiten medir y monitorear la producción de energía del sistema fotovoltaico en tiempo real. Tiene 3 funciones:
 - Medición de producción: Registra la cantidad de energía generada y consumida.
 - Monitoreo remoto: Proporciona datos en tiempo real a través de plataformas en línea, lo que permite a los usuarios y operadores detectar problemas y optimizar el rendimiento del sistema.
 - Integración con redes inteligentes: Facilita la gestión eficiente de la energía y la participación en programas de respuesta a la demanda.

2.3. Marco conceptual

Rastreador solar

- Eficiencia de Seguimiento: Esta dimensión se refiere a la precisión con la que los rastreadores solares siguen el movimiento del sol durante el día para optimizar la captación de energía solar. El indicador puede medirse como el porcentaje de tiempo durante el cual los rastreadores están alineados con el sol en comparación con el tiempo total disponible de luz solar durante un período determinado.
- Capacidad de Carga: Esta dimensión se refiere a la capacidad máxima de carga que pueden soportar los rastreadores solares. Se mide en kilovatios (kW) o megavatios (MW) y representa la cantidad máxima de energía que pueden generar y transferir a la red eléctrica o a las baterías de almacenamiento.
- Orientación e Inclinación: Esta dimensión se refiere a la capacidad de los rastreadores solares para ajustar su orientación e inclinación con el fin de captar la mayor cantidad de radiación solar posible. El indicador puede medirse en grados y representa el rango de movimiento que tienen los rastreadores para adaptarse a las diferentes condiciones solares y maximizar la eficiencia de captación.

Sistemas fotovoltaicos

- **Eficiencia de Conversión:** Esta dimensión se refiere a la eficiencia con la que los sistemas fotovoltaicos convierten la radiación solar en electricidad utilizable. El indicador "Rendimiento energético" se calcula como el porcentaje de la energía solar incidente que se convierte en electricidad y no se pierde en el proceso.
- **Autonomía y Almacenamiento:** Esta dimensión se centra en la capacidad del sistema fotovoltaico para almacenar la energía generada para su uso posterior. El indicador "Capacidad de almacenamiento" se mide en kilovatios-hora (kWh) y representa la cantidad máxima de energía que el sistema puede almacenar para satisfacer la demanda energética cuando no hay suficiente radiación solar disponible.
- **Sostenibilidad y Durabilidad:** Esta dimensión evalúa la sostenibilidad a largo plazo y la durabilidad del sistema fotovoltaico. El indicador "Vida útil del sistema" se expresa en años y representa el tiempo estimado en el cual el sistema puede mantener su rendimiento óptimo antes de requerir una actualización o reemplazo. Aspectos como la resistencia a las condiciones climáticas, la degradación de los materiales y la capacidad de reciclaje también se consideran en esta dimensión

2.4. Definición de términos básicos

- **Actuadores:** Componentes mecánicos o electrónicos en el rastreador solar que permiten ajustar su posición para seguir el movimiento del sol.
- **Sensor Solar:** Dispositivo que detecta la posición del sol en el cielo y proporciona información al rastreador solar para realizar los ajustes necesarios.
- **Motorización:** El proceso de automatización del rastreador solar, permitiendo ajustes precisos y automáticos de su orientación y posición.
- **Rastreador Solar de Un Eje:** Tipo de rastreador que se mueve en un solo eje (horizontal o vertical) para seguir el movimiento del sol durante el día.
- **Rastreador Solar de Dos Ejes:** Tipo de rastreador que se mueve en dos ejes (horizontal y vertical) para seguir el movimiento diario del sol y su variación estacional, maximizando la captación de radiación solar.

- Almacenamiento de Energía: Capacidad de acumular el excedente de energía generada por el sistema fotovoltaico en baterías u otros dispositivos para su uso en momentos de baja radiación solar.
- Punto de Máxima Potencia (MPP): Punto operativo óptimo en el cual los paneles solares generan la máxima potencia eléctrica para una determinada radiación solar.
- Microinversor: Pequeño inversor instalado en cada panel solar individualmente, permitiendo un seguimiento individualizado y mejorando la eficiencia del sistema fotovoltaico.
- Eficiencia de Inversor: Eficiencia con la que el inversor convierte la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA), minimizando las pérdidas de energía en el proceso.
- Red Eléctrica: Sistema de distribución de energía eléctrica conectado a la infraestructura pública, donde los sistemas fotovoltaicos pueden inyectar energía cuando producen un excedente y tomar energía en momentos de baja generación solar.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis General

El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Hipótesis Especifica

El rastreador solar mejora la eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

El rastreador solar mejora la autonomía y almacenamiento del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

El rastreador solar mejora la sostenibilidad y durabilidad del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

3.1.1. Operacionalización de variable

Tabla 2. Operacionalización de variables

Variable	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Rastreador Solar	Es un dispositivo tecnológico utilizado en sistemas de captación de energía solar fotovoltaica, caracterizado por su capacidad de optimizar la eficiencia energética mediante el seguimiento preciso del movimiento del sol. Ello se representa en eficiencia de seguimiento, cuenta con una capacidad de carga y una orientación e inclinación.	Eficiencia de seguimiento	% de seguimiento solar
		Capacidad de carga	Potencia máxima soportada
		Orientación e inclinación	Angulo de seguimiento y ajuste
Sistemas fotovoltaicos	Se refiere a un conjunto de tecnologías que utilizan celdas solares para convertir la radiación solar en electricidad de corriente continua. Estos sistemas están diseñados para captar la luz solar y generar una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación recibida. La electricidad generada puede ser utilizada directamente para alimentar dispositivos o ser convertida en corriente alterna mediante inversores para su integración a la red eléctrica.	Eficiencia de Conversión	Rendimiento energético
		Autonomía y almacenamiento	Capacidad de almacenamiento
		Sostenibilidad y Durabilidad	Vida útil del sistema

Fuente: Elaboración propia del autor

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

La investigación sería de tipo explicativa, ya que busca establecer la relación causal entre el uso de rastreadores solares y la mejora del rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú. Se busca entender de qué manera la implementación de esta tecnología influye en la eficiencia y generación de energía en dichas áreas.[15]

El diseño de investigación adecuado es el diseño cuasiexperimental. En este caso, se compararían dos grupos de sistemas fotovoltaicos: uno con rastreadores solares y otro sin ellos, en áreas rurales del Perú. Se realizarían mediciones y análisis durante un período determinado, permitiendo establecer diferencias en el rendimiento y eficiencia entre ambos grupos

4.2. Método de investigación

Para llevar a cabo el estudio, se utilizaría un enfoque mixto, combinando tanto métodos cuantitativos como cualitativos. Se emplearían mediciones y registros cuantitativos para evaluar datos específicos sobre la generación de energía y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos con y sin rastreadores solares. Además, se realizarían entrevistas y encuestas cualitativas a usuarios y expertos para obtener percepciones y opiniones sobre la implementación de esta tecnología y su impacto en las zonas rurales del Perú. La combinación de ambos métodos permitiría obtener una visión completa y detallada de la manera en que los rastreadores solares mejoran el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en dichas áreas.

4.3. Población y muestra

Población

La población estará conformada 65000 sistemas fotovoltaicos que hay en las zonas rurales del Perú.

Muestra

Para el cálculo de la muestra se utilizará la fórmula para poblaciones finitas.

$$n_0 = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$
$$n_0 = \frac{65000 \cdot 1.64^2 \cdot 0.9 \cdot 0.1}{0.05^2 \cdot (65000 - 1) + 1.64^2 \cdot 0.9 \cdot 0.1} = 97.5 \approx 98$$

Donde:

N: tamaño poblacional (65000)

Z: valor de la distribución normal (1.64)

p: probabilidad de éxitos (0.9)

q: probabilidad de fracasos (0.1)

e: error relativo (0.05)

n_0 : tamaño de muestra inicial

n: tamaño muestral

Verificamos si se cumple la regla para realizar el ajuste a la muestra:

$$\frac{n_0}{N} > 0.05 \rightarrow \frac{97.5}{65000} > 0.05 \rightarrow 0.0015 > 0.05$$

Dado que no se cumple la regla no se haría un ajuste teniendo así que nuestra muestra es de 98 sistemas fotovoltaicos pertenecientes a las zonas rurales del Perú

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

La investigación se llevará a cabo en las zonas rurales del Perú que cuenten con un sistema fotovoltaico y tendrá una duración de 6 meses teniendo su inicio de abril hasta setiembre del 2024.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Para recolectar la información se usará una ficha de observación donde se registrará la eficiencia de conversión, autonomía y almacenamiento; y sostenibilidad y durabilidad, empleando técnicas como la observación directa y

el monitoreo y registro de datos, revisando la información de sistemas fotovoltaicos con y sin rastreadores solares en diferentes ubicaciones rurales para comparar la generación de energía durante un periodo de tiempo determinado, considerando variables como la radiación solar y las condiciones climáticas. También se pueden emplear técnicas de seguimiento y análisis en tiempo real para evaluar la eficiencia de los rastreadores solares, registrando datos sobre su eficiencia en diferentes momentos del día y en distintas condiciones climáticas para comparar el rendimiento del sistema fotovoltaico con el rastreador solar activado y desactivado.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis y procesamiento de datos se utilizará una ficha de observación diseñada para registrar información relevante. Esta ficha recopilará datos sobre la eficiencia de conversión, autonomía y almacenamiento, así como aspectos relacionados con la sostenibilidad y durabilidad de los sistemas fotovoltaicos con y sin rastreadores solares en diferentes ubicaciones rurales.

Se emplearán diversas técnicas, como la observación directa y el monitoreo y registro de datos. Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la información recopilada durante un período de tiempo determinado, considerando variables cruciales como la radiación solar y las condiciones climáticas de cada ubicación rural.

Además, se aplicarán técnicas de seguimiento y análisis en tiempo real para evaluar la eficiencia de los rastreadores solares. Los datos recopilados registrarán la eficiencia de los rastreadores en diferentes momentos del día y bajo distintas condiciones climáticas para comparar el rendimiento del sistema fotovoltaico con el rastreador solar activado y desactivado.

El análisis y procesamiento de datos permitirá determinar de manera precisa y rigurosa cómo los rastreadores solares afectan el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú en 2024. Estos resultados serán fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la implementación de

rastreadores solares y su impacto en la generación de energía en entornos rurales

4.7. Aspectos éticos en investigación

En la presente investigación es crucial considerar diversos aspectos éticos. Primero, se debe obtener el consentimiento informado de los participantes involucrados en la instalación y monitoreo de los sistemas fotovoltaicos, asegurando que comprendan los objetivos, riesgos y beneficios del estudio. Además, se debe proteger la privacidad y confidencialidad de los datos recopilados, garantizando el anonimato de los participantes y el uso adecuado de la información obtenida. La investigación también debe ser conducida con integridad científica, evitando sesgos o manipulaciones de datos, y respetando los principios de honestidad y transparencia. Asimismo, se debe tener en cuenta el impacto ambiental de la investigación, minimizando cualquier posible daño al medio ambiente y maximizando los beneficios para las comunidades rurales involucradas. En general, la ética debe ser una consideración fundamental en cada etapa de la investigación, asegurando que se realice de manera responsable y respetuosa con los derechos y bienestar de todas las partes involucradas.

V. RESULTADOS

5.1. Descripción general

Se llevó a cabo un proceso estructurado para recopilar y analizar datos relevantes sobre los sistemas fotovoltaicos con y sin rastreadores solares que fueron instalados por Ergon Perú SAC con el apoyo del Ministerio de Energía y Minas (MEM). Para obtener estos datos estuvimos en comunicación con dicha organización y obtener los indicadores de los sistemas fotovoltaicos tenemos que:

- **Rendimiento Energético:** Este indicador cuantifica la cantidad de energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico en relación con la energía solar incidente durante un período específico.

El rendimiento energético de un sistema fotovoltaico se calcula en kilovatios-hora (kWh) y representa la cantidad de energía eléctrica que el sistema genera durante un período de tiempo específico, generalmente en un mes o un año. Vamos a poner un ejemplo de cómo hemos realizado el cálculo para cada uno de los sistemas fotovoltaicos:

$$\begin{aligned} & \text{Energía generada (kWh)} \\ & = \text{Potencia nominal del sistema (kWp)} \\ & \times \text{Factor de rendimiento} \times \text{Horas en el período} \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{Energía generada} & = 10 \text{ kWp} \times 0.85 \times 160\text{h} \\ \text{Energía generada} & = 1360 \text{ kWh} \end{aligned}$$

En este ejemplo, el sistema fotovoltaico habría generado aproximadamente 1360 kWh de energía eléctrica durante el mes, considerando las condiciones y el factor de rendimiento especificados.

- **Capacidad de Almacenamiento:** Se refiere a la capacidad del sistema para almacenar la energía generada, lo cual es crucial para asegurar un suministro continuo de electricidad, especialmente en áreas donde la red eléctrica puede ser intermitente o no estar disponible.

Para calcular la capacidad de almacenamiento adecuada para un sistema fotovoltaico primero, se necesita conocer el consumo eléctrico diario

promedio de tu hogar o del sistema que estás diseñando. Esto se obtuvo revisando tus facturas eléctricas mensuales o mediante una estimación basada en el uso habitual de aparatos eléctricos. También debe definir cuantos días de autonomía se tiene se calcula mediante la siguiente formula:

$$\begin{aligned} & \textit{Capacidad de almacenamiento (kWh)} \\ & = \textit{Consumo eléctrico diario promedio (kWh/día)} \\ & \times \textit{Número de días de autonomía deseada} \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$\textit{Capacidad de almacenamiento} = 20 \frac{\textit{kWh}}{\textit{día}} \times 30 \textit{ días} = 600\textit{kWh}$$

Consideraciones adicionales

- Eficiencia del Sistema de Almacenamiento: Considera la eficiencia del sistema de almacenamiento (generalmente alrededor del 85% al 95%) al calcular la capacidad real necesaria.
- Patrones de Uso: Evalúa los patrones de uso y las variaciones estacionales en el consumo para ajustar la capacidad de almacenamiento según las necesidades específicas de tu situación.
- **Vida Útil del Sistema:** Este indicador evalúa la durabilidad y longevidad del sistema fotovoltaico, considerando factores como la degradación de los paneles solares, componentes electrónicos y estructuras de soporte. Se determinó la vida útil en condiciones de operación reales.

Proceso de recopilación de datos

- Consulta con el ministerio de energía y minas (MEM): Se estableció comunicación con el MEM para obtener información detallada sobre los sistemas fotovoltaicos instalados. Esto incluye datos específicos sobre la eficiencia del seguimiento de los rastreadores solares, la capacidad de carga, y la orientación e inclinación de los mismos.
- Análisis de documentación y datos de campo: Se revisó la documentación técnica proporcionada y se realizaron algunas visitas de campo a los sistemas fotovoltaicos que estaban más accesibles para corroborar la

información verificando alineación de los rastreadores solares y registros de rendimiento energético.

- Medición y Evaluación In Situ: Se llevaron a cabo las mediciones directas en los sistemas fotovoltaicos a los que se tuvo acceso para obtener datos precisos del rendimiento, capacidad de almacenamiento y la evaluación visual de la orientación e inclinación de los rastreadores solares.

De los 98 sistemas fotovoltaicos que se han analizado se tomó 49 con rastreadores solares y 49 sin rastreadores solares.

5.2. Análisis Descriptivo

Se generaron los gráficos respecto a las 3 dimensiones evaluadas:

Empezamos por los sistemas fotovoltaicos que no cuentan con rastreadores solares:

Tabla 3. Estadísticos descriptivos del rendimiento energético sin rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Rendimiento energético por mes (kWh)	49	1860	14946	7219,92	3323,443
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

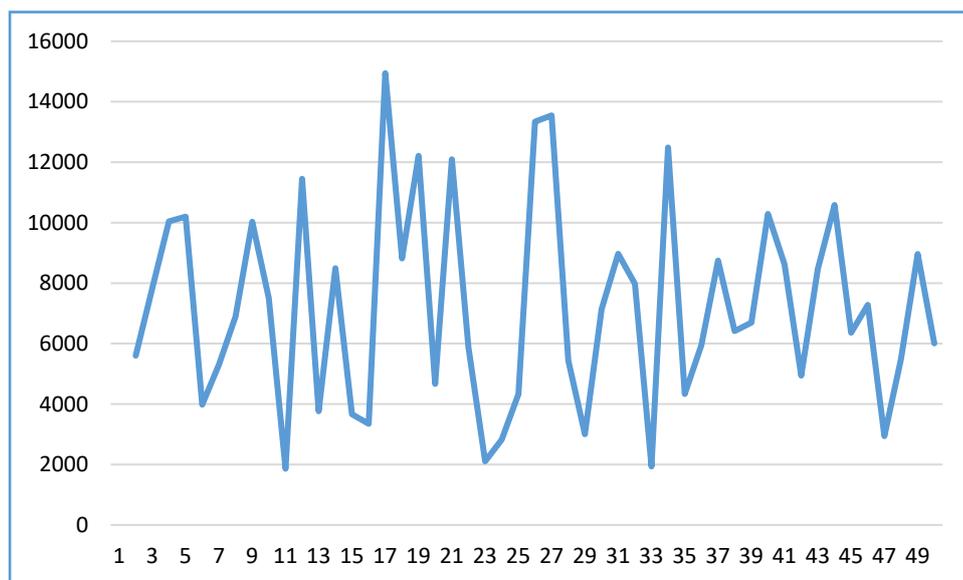


Figura 6. Rendimiento energético por mes (kWh) sin rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto al rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares tienen un mínimo de 1860 kWh y un valor máximo de 14946 kWh también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 7219.92. El rendimiento puede variar ya que se trabaja el rendimiento mediante el potencial nominal del sistema el cual va en función de la capacidad y cantidad de los paneles solares y ello en base a la demanda ya que los sistemas fotovoltaicos instalados en algunos lugares cubren una demanda de entre 5 viviendas a 40 viviendas.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la capacidad de almacenamiento sin rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Capacidad de almacenamiento (kWh)	49	1993	16014	7735,67	3560,830
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

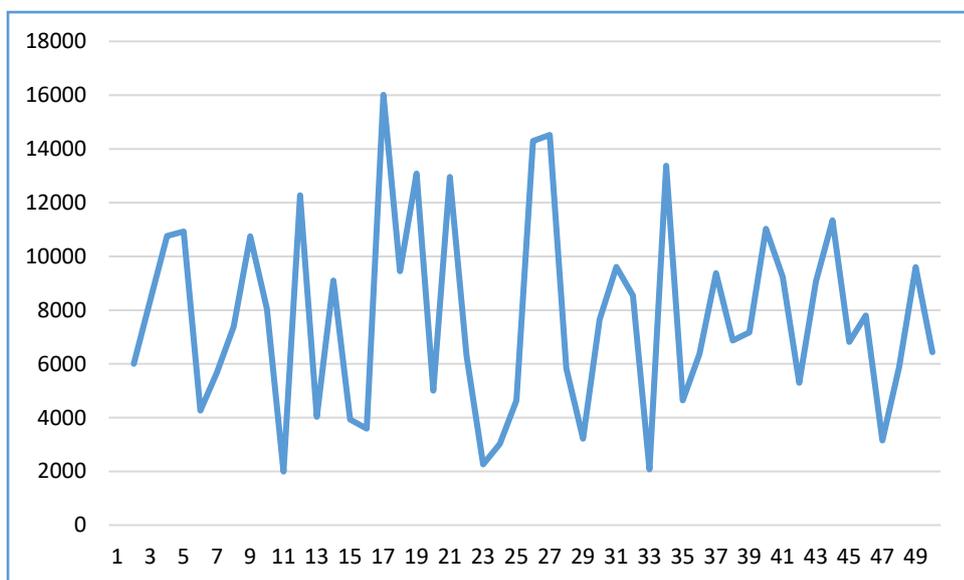


Figura 7. Capacidad de almacenamiento (kWh) sin rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto a la capacidad de almacenamiento en los sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares tienen un mínimo de 1993 kWh y un valor máximo de 16014 kWh también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 7735.67. La capacidad de almacenamiento puede variar ya que se calculó en base al consumo eléctrico diario y ello depende de la cantidad de viviendas que cubra el sistema fotovoltaico.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la vida útil del sistema fotovoltaico sin rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Vida útil del sistema (años)	49	16	29	21,57	3,769
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

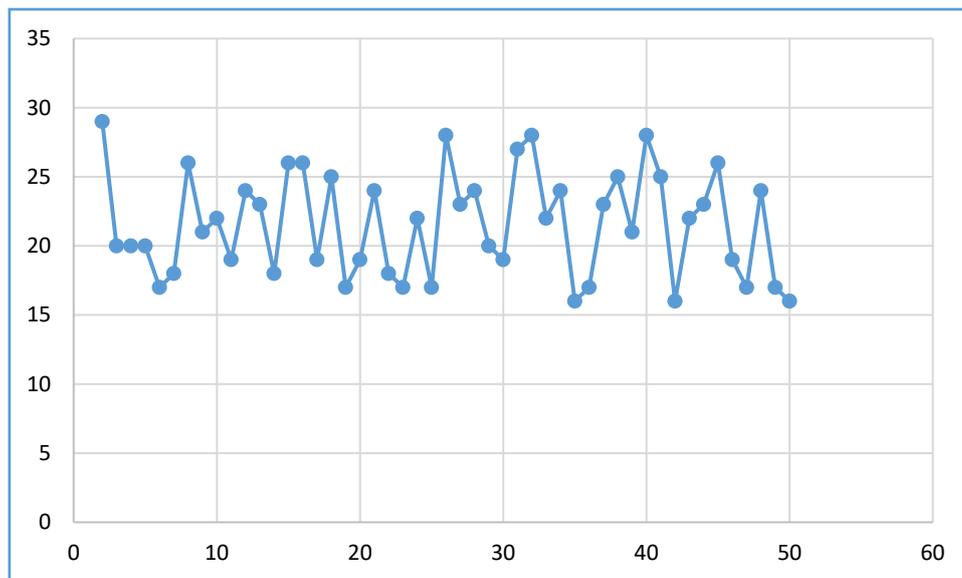


Figura 8. Vida útil del sistema fotovoltaico (años) sin rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto a la vida útil de los sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares tienen un mínimo de 16 años y un valor máximo de 29 años también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 21 años y medio. En este caso la variación de la vida útil puede darse por desgaste debido a situaciones ambientales o mal cuidado del mismo.

Ahora analizaremos los sistemas fotovoltaicos que si cuentan con rastreadores solares.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos del rendimiento energético con rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Rendimiento energético por mes (kWh)	49	2454	15463	7968,16	3313,975
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

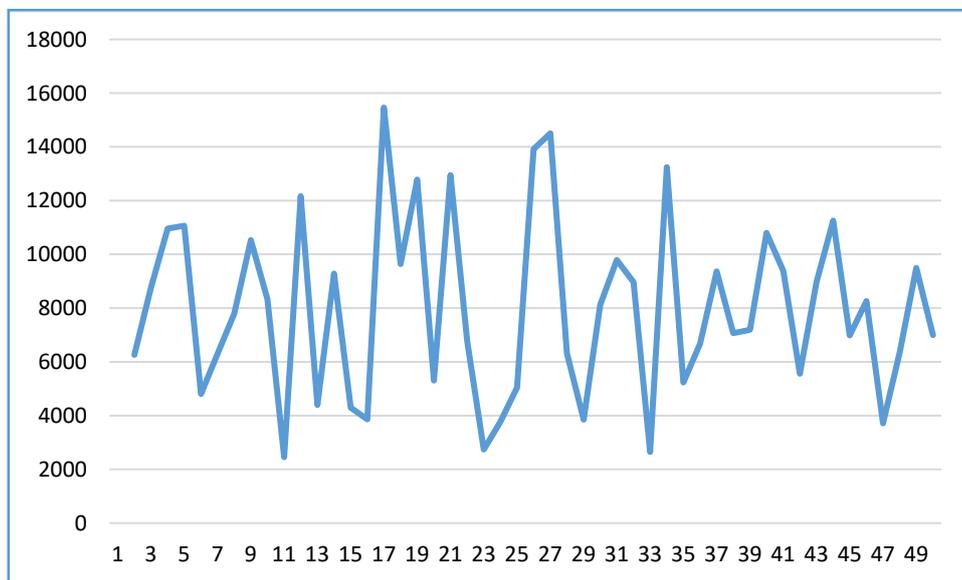


Figura 9. Rendimiento energético por mes (kWh) con rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto al rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares tienen un mínimo de 2454 kWh y un valor máximo de 15463 kWh también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 7968.16. Es destacable mencionar que el rendimiento se ve afectado por la captación solar y el aprovechamiento de la radiación solar incidente.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de la capacidad de almacenamiento con rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Capacidad de almacenamiento (kWh)	49	2666	16595	8467,14	3563,220
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

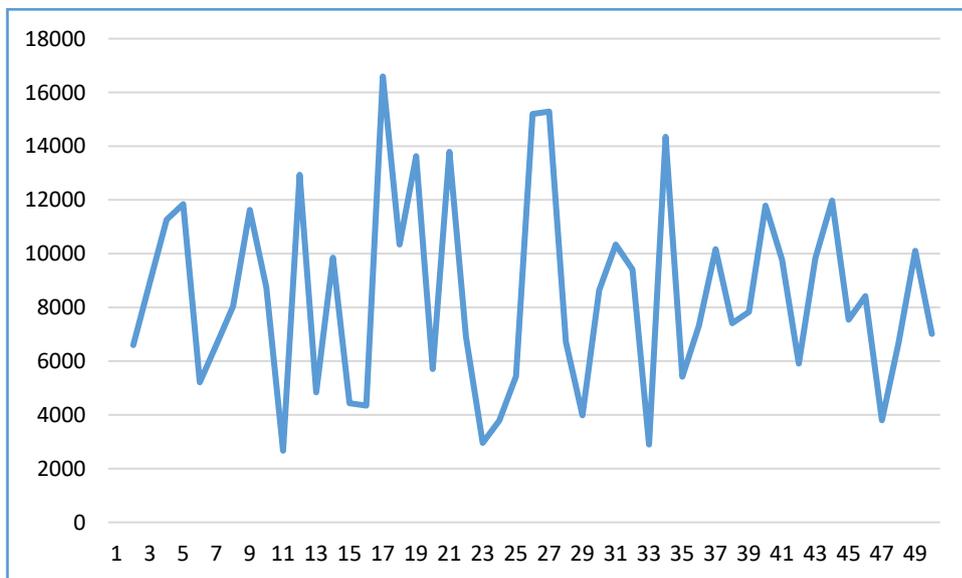


Figura 10. Capacidad de almacenamiento (kWh) con rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto a la capacidad de almacenamiento en los sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares tienen un mínimo de 2666 kWh y un valor máximo de 16595 kWh también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 8467.14. Teniendo en cuenta que los sistemas fotovoltaicos analizados con y sin rastreadores cubrían una demanda energética similar es de tener en cuenta que la capacidad de almacenamiento es importante para un sistema fotovoltaico con mayor rendimiento.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de la vida útil del sistema fotovoltaico con rastreadores

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Vida útil del sistema (años)	49	18	30	23,59	3,763
N válido (por lista)	49				

Fuente: Elaboración propia del autor

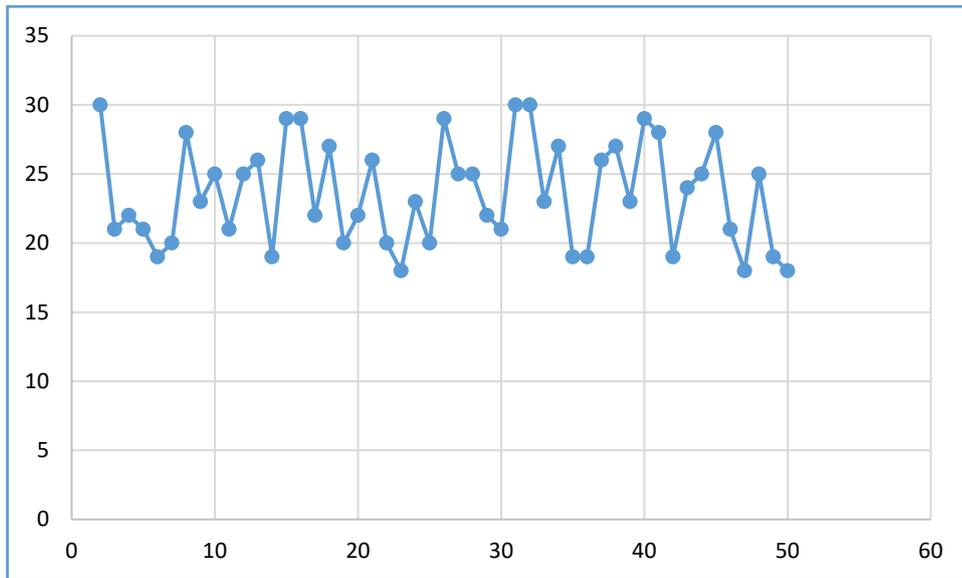


Figura 11. Vida útil del sistema fotovoltaico (años) con rastreadores

Como podemos apreciar vemos que respecto a la vida útil de los sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares tienen un mínimo de 18 años y un valor máximo de 30 años también es de tener en cuenta que ello presenta una media de 23 años y medio. En este caso el aumento de la vida útil se da debido al uso de rastreadores solares sin embargo es de tener en cuenta que no es muy grande el incremento dado que al utilizar un rastreador solar para controlar la orientación e inclinación de los paneles y aprovechar eficientemente la radiación solar el movimiento proporciona un desgaste mecánico.

Comparativa de medias para análisis

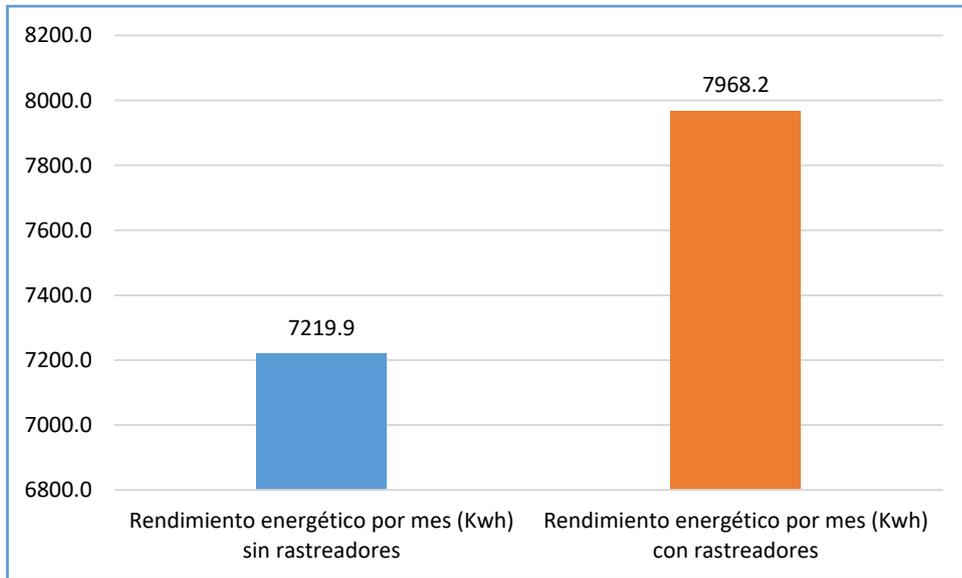


Figura 12. Comparando medias del rendimiento energético

Como se puede apreciar al analizar el indicador de rendimiento energético por mes (kWh) con y sin rastreadores solares podemos ver que el rendimiento es mucho menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 7219.9 kWh y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 7968.2 kWh demostrando así que los rastreadores ayudan a tener un incremento en el rendimiento energético.

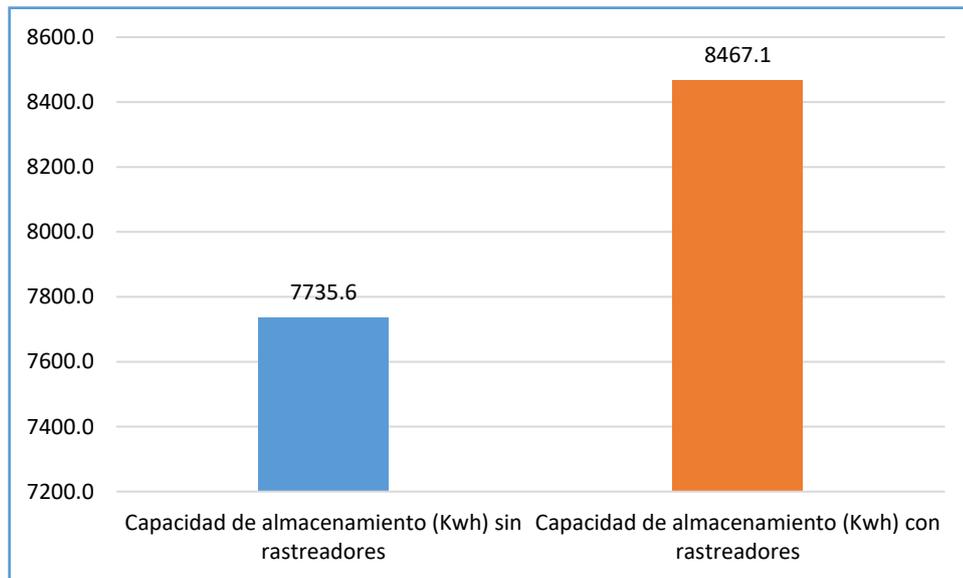


Figura 13. Comparando medias de la capacidad de almacenamiento

Como se puede apreciar al analizar el indicador de capacidad de almacenamiento (kWh) con y sin rastreadores solares podemos ver que capacidad de almacenamiento es mucho menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 7735.6 kWh y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 8467.1 kWh demostrando así que los rastreadores ayudan a tener una capacidad de almacenamiento mucho mayor ya que se aprovecha de manera más eficiente la radiación solar.

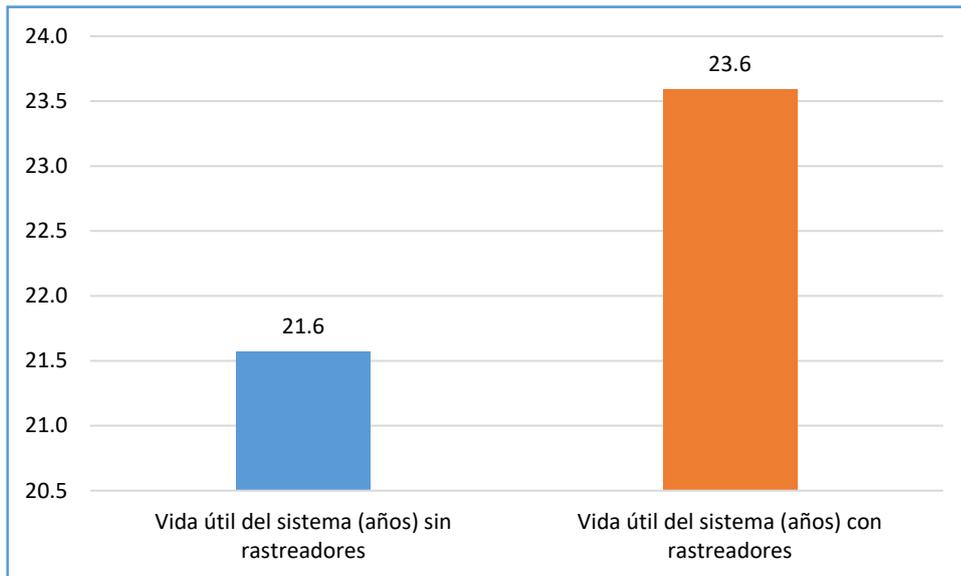


Figura 14. Comparando medias de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos

Como se puede apreciar al analizar el indicador de vida útil con y sin rastreadores solares podemos ver que la vida útil es menor en el caso que no se cuenta con rastreadores siendo una media de 22 años y en el caso de contar con rastreadores se obtuvo una media de 24 años demostrando así que los rastreadores ayudan a incrementar la vida útil ligeramente ya que así como se incrementa la eficiencia también se tiene un desgaste ya que los paneles fotovoltaicos modifican la orientación e inclinación de los paneles para aprovechar la radiación solar.

5.3. Análisis Inferencial

Análisis de prueba T-Student para comparar las muestras emparejadas de 2 grupos que están relacionados.

Hipótesis general

H₁: El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

H₀: El rastreador solar no mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Tabla 9. Prueba T-Student para el rendimiento energético comparando con y sin rastreador solar

	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
				Inferior	Superior			
Rendimiento de sistemas fotovoltaicos con y sin rastreadores solares	493,91156	76,43137	10,91877	515,86522	471,95791	45,235	48	,000

Fuente: Elaboración propia del autor

Como se puede observar en la prueba T-Student del rendimiento del sistema fotovoltaico se comparó las medias de los datos con rastreador solar y los datos sin rastreador solar y se obtuvo un p-valor de 0 ya que este es menor a 0.05 se acepta la hipótesis alterna obteniendo así que el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

Al analizar el valor t obtenido tenemos que es de 45.235 y el valor t tabulado que sale del nivel de confianza y el grado de libertad es de 1.6772, ya que nuestro valor t es mayor al t tabulado se concluye que existe correlación entre las variables analizadas.

Hipótesis Especifica 1

H₁: El rastreador solar mejora la eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

H₀: El rastreador solar no mejora la eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Tabla 10. Prueba T-Student para la eficiencia de conversión comparando con y sin rastreador solar

	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Rendimiento energético por mes (kWh) con rastreador solar – Rendimiento energético por mes (kWh) sin rastreador solar	748,245	157,535	22,505	702,996	793,494	33,248	48	,000

Fuente: Elaboración propia del autor

Como se puede observar en la prueba T-Student de la eficiencia de conversión se comparó las medias de los datos con rastreador solar y los datos sin rastreador solar y se obtuvo un p-valor de 0 ya que este es menor a 0.05 se acepta la hipótesis alterna obteniendo así que el rastreador solar mejora la eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Al analizar el valor t obtenido tenemos que es de 33.248 y el valor t tabulado que sale del nivel de confianza y el grado de libertad es de 1.6772, ya que nuestro valor t es mayor al t tabulado se concluye que existe correlación entre las variables analizadas.

Hipótesis Especifica 2

H₁: El rastreador solar mejora la autonomía y almacenamiento del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

H₀: El rastreador solar no mejora la autonomía y almacenamiento del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Tabla 11. Prueba T-Student para la autonomía y almacenamiento comparando con y sin rastreador solar

	Media	Desviación estándar	Diferencias emparejadas		t	gl	Sig. (bilateral)
			Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia Inferior Superior			
Capacidad de almacenamiento (kWh) con rastreador solar – Capacidad de almacenamiento (kWh) sin rastreador solar	731,469	137,821	19,689	691,882 771,056	37,152	48	,000

Fuente: Elaboración propia del autor

Como se puede observar en la prueba T-Student de la autonomía y almacenamiento se comparó las medias de los datos con rastreador solar y los datos sin rastreador solar y se obtuvo un p-valor de 0 ya que este es menor a 0.05 se acepta la hipótesis alterna obteniendo así que el rastreador solar mejora la autonomía y almacenamiento del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Al analizar el valor t obtenido tenemos que es de 37.152 y el valor t tabulado que sale del nivel de confianza y el grado de libertad es de 1.6772, ya que nuestro valor t es mayor al t tabulado se concluye que existe correlación entre las variables analizadas.

Hipótesis Especifica 3

H₁: El rastreador solar mejora la sostenibilidad y durabilidad del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

H₀: El rastreador solar no mejora la sostenibilidad y durabilidad del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Tabla 12. Prueba T-Student para la sostenibilidad y durabilidad comparando con y sin rastreador solar

	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	Diferencias emparejadas		t	gl	Sig. (bilateral)
				95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Vida útil del sistema (años) con rastreador solar - Vida útil del sistema (años) sin rastreador solar	2,020	,750	,107	1,805	2,236	18,864	48	,000

Fuente: Elaboración propia del autor

Como se puede observar en la prueba T-Student de la sostenibilidad y durabilidad se comparó las medias de los datos con rastreador solar y los datos sin rastreador solar y se obtuvo un p-valor de 0 ya que este es menor a 0.05 se acepta la hipótesis alterna obteniendo así que el rastreador solar mejora la sostenibilidad y durabilidad del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024.

Al analizar el valor t obtenido tenemos que es de 18.864 y el valor t tabulado que sale del nivel de confianza y el grado de libertad es de 1.6772, ya que nuestro valor t es mayor al t tabulado se concluye que existe correlación entre las variables analizadas.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Hipótesis General

Se pudo comprobar la hipótesis “El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024” ya que la tecnología de rastreo solar optimiza la captación de energía solar al ajustar continuamente la orientación de los paneles fotovoltaicos para seguir la trayectoria del sol a lo largo del día. Este enfoque maximiza la eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad, superando significativamente el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos estáticos. Los datos obtenidos indican que los sistemas fotovoltaicos equipados con rastreadores solares han experimentado un aumento considerable en la generación de energía en comparación con los sistemas tradicionales sin rastreo. Además, la adopción de esta tecnología no solo implica un incremento en la producción de energía, sino también una mejor utilización de los recursos solares disponibles, lo cual es fundamental en regiones con altos niveles de irradiación solar, como muchas zonas rurales del Perú. La eficiencia mejorada contribuye a una mayor independencia energética y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, alineándose con las metas de sostenibilidad y desarrollo energético del país.

Hipótesis Específica 1

Se pudo comprobar la hipótesis “El rastreador solar mejora la eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024” ya que el uso de rastreadores solares ha demostrado una mejora significativa en la eficiencia de conversión de los sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales. La tecnología de rastreo solar, al permitir que los paneles fotovoltaicos sigan de manera óptima el movimiento del sol a lo largo del día, maximiza la captación de energía solar y su posterior conversión en electricidad. Los análisis de rendimiento energético han confirmado que los sistemas fotovoltaicos equipados con rastreadores solares presentan una mayor eficiencia de conversión en comparación con los sistemas tradicionales fijos. Esto se traduce en un

aprovechamiento más efectivo de la irradiación solar disponible, incrementando la cantidad de energía eléctrica generada por unidad de área de panel fotovoltaico. Esta mejora en la eficiencia de conversión es especialmente relevante en las zonas rurales del Perú, donde el acceso a una fuente de energía constante y confiable es vital para el desarrollo económico y la mejora de la calidad de vida. La implementación de rastreadores solares permite una producción energética más estable y eficiente, lo cual es crucial en regiones con una alta variabilidad en la disponibilidad de energía.

Hipótesis Especifica 2

Se pudo comprobar la hipótesis “El rastreador solar mejora la autonomía y almacenamiento del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024” ya que la implementación de rastreadores solares ha demostrado una notable mejora en la autonomía y capacidad de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú en 2024. Al permitir que los paneles fotovoltaicos sigan de manera óptima el movimiento del sol, los rastreadores solares maximizan la captación de energía, lo que resulta en una mayor cantidad de energía generada y disponible para su almacenamiento. El análisis de la capacidad de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos equipados con rastreadores solares ha revelado una mejora significativa en comparación con los sistemas sin rastreo. Esta mejora se traduce en una mayor autonomía energética, ya que los sistemas son capaces de generar y almacenar más energía durante el día, lo que permite un suministro más constante y confiable de electricidad, especialmente durante las horas sin luz solar. Además, la mayor eficiencia en la captación y almacenamiento de energía solar reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables y costosas, promoviendo la sostenibilidad y la autosuficiencia energética. Esto es particularmente importante en un contexto global que busca mitigar el cambio climático y promover el uso de energías renovables.

Hipótesis Especifica 3

Se pudo comprobar la hipótesis “El rastreador solar mejora la sostenibilidad y durabilidad del sistema fotovoltaico en las zonas rurales del Perú – 2024” ya que

la implementación de rastreadores solares ha demostrado una mejora significativa en la sostenibilidad y durabilidad de los sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú en 2024. Al optimizar la orientación de los paneles para seguir la trayectoria del sol, los rastreadores solares permiten una captación más eficiente de la energía solar, lo que reduce el estrés y desgaste en los componentes del sistema. El análisis de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos equipados con rastreadores solares ha mostrado que estos sistemas no solo generan más energía, sino que también operan de manera más eficiente y con menos esfuerzo. Esto resulta en una menor tasa de fallos y una prolongación de la vida útil de los componentes, incluyendo los paneles y las baterías de almacenamiento. La mayor durabilidad de los sistemas implica menos necesidades de mantenimiento y reemplazo, lo que reduce los costos a largo plazo y aumenta la viabilidad económica de estos sistemas en áreas rurales. En términos de sostenibilidad, los rastreadores solares contribuyen a un uso más eficiente de los recursos solares, maximizando la producción de energía renovable y reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables. Este enfoque no solo es ambientalmente beneficioso, sino que también asegura un suministro energético más confiable y constante para las comunidades rurales, que a menudo enfrentan desafíos significativos en el acceso a energía estable.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En la investigación realizada por Carbajal y cols. en el 2020 obtuvo como resultados que las potencias generadas por el panel fotovoltaico con seguidor solar difuso son consideradas muestras del grupo experimental y las potencias obtenidas por el panel fotovoltaico con posición fija representa las muestras del grupo control. Estas muestras se sometieron a prueba t de Student para muestras emparejadas a ambas colas para un nivel de confianza del 95% y nivel de significación de $\alpha=0.05$. Se concluyó que a partir de los resultados del análisis de las muestras para una significancia de $\alpha=0.05$ y un valor-p = 0.006 que es menor que la significancia, se acepta que los promedios de las potencias eléctricas obtenidas en los paneles fotovoltaicos con rastreador solar difuso y el panel fotovoltaico con posición fija son estadísticamente diferentes. Esta

diferencia es de aproximadamente 10.10 W, el cual significa una mejora en la obtención de energía eléctrica alrededor de 25.28 %. En nuestro caso sucedió de manera similar ya que obtuvimos un p-valor en la prueba T-Student menor a 0.05 y se pudo comprobar que hubo una mejora en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos al incorporar un rastreador solar alrededor del 11%.

En la investigación realizada por Nieto y Ramos en el 2021 la cual obtuvo como resultados que mediante ecuaciones matemáticas se logró determinar la inclinación óptima de 5.23°, también se tomó valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto del módulo de 30W, el mejor valor corriente se obtuvo a los 5°, para valores de voltaje de mantenía prácticamente estable desde los 0 hasta los 30°, para comprobar los resultados obtenidos se llevó el análisis a un software de dimensionamiento que se pueda modificar los parámetros de inclinación y orientación, para los ángulos comprendidos entre 0 y 90° no se tiene error por ángulo óptimo sin embargo para 5° se tiene una mayor cantidad de irradiación solar. En nuestro caso obtuvimos que los rastreadores solares implementaron tenían una inclinación mínima de 20° y una máxima de 35° y una orientación mínima de 150° y una máxima de 180°, así mismo se considero la eficiencia del seguimiento la cual estuvo en un valor mínimo de 88% y un máximo de 99%.

En la investigación realizada por Parrilla y Prieto en el 2023 la cual obtuvo resultados que para el caso de sistema fotovoltaico con seguidor, los fabricantes de este tipo de estructuras comercializan para sistemas fotovoltaicos a partir de 200 kW; en caso la demanda sea menor a la cantidad mínima de venta, el precio no varía, el sistema fotovoltaico conectado a red montado en estructura seguidor, pese a tener un retorno de inversión de, aproximadamente, 10 años, siendo este período menor al tiempo de vida útil del sistema, presenta menor energía producida (22.973 MWh) respecto a su contraparte de estructura fija (32.223 MWh y 2 años de retorno de inversión). En nuestro caso al analizar los datos que obtuvimos fueron similares teniendo así un valor mínimo del rendimiento energético por mes de 2454 kWh y uno máximo de 15463 kWh existe una alta variación debido a que se analizaron múltiples sistemas

fotovoltaicos y en algunas ocasiones cubrían pocas viviendas por lo cual la demanda era mucho menor.

En la investigación realizada por Vidal en el 2022 la cual obtuvo resultados que fueron que para el ángulo de inclinación del panel se utilizó la teoría de ángulos astronómicos el cual indica que se puede utilizar los mismos grados que la latitud del lugar, para nuestro caso se tiene una Latitud de -12.03534 , entonces el panel tiene una inclinación de 12 grados. El coeficiente de rendimiento (PR, Performance Ratio) de un sistema fotovoltaico es la relación entre la producción real de un sistema fotovoltaico y la irradiación solar recibida in situ, y se utiliza para evaluar la calidad del sistema en un sistema estático se alcanza un valor de 66.3%. La fracción solar se mejora con respecto a una instalación estática alcanzando valores de 0.605 es decir se aprovecha el 60.5% de energía a través de un panel solar. El coeficiente de rendimiento del sistema tiene un valor de 52.8 %. Estos resultados fueron similares a los que obtuvimos ya que obtuvimos un contraste bastante significativo entre los sistemas fotovoltaicos que cuentan con rastreadores solares y los que no, ya que conseguimos obtener una mejora respecto al rendimiento energético, capacidad de almacenamiento y la vida útil de los sistemas fotovoltaicos. En primer lugar, se encontró una mejora notable en el rendimiento energético de los sistemas equipados con rastreadores solares. Estos dispositivos permiten a los paneles fotovoltaicos seguir la trayectoria óptima del sol a lo largo del día, maximizando así la captación de energía solar. Además, se observó un incremento en la capacidad de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares. Al captar más energía solar de manera eficiente, estos sistemas pudieron acumular una mayor reserva de energía, lo que es crucial para asegurar un suministro constante y confiable, especialmente en zonas rurales donde las interrupciones en el suministro eléctrico son comunes. Otro aspecto relevante fue la prolongación de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos. La optimización en la captación de energía solar y la reducción del estrés mecánico en los paneles y componentes gracias a los rastreadores solares contribuyeron a una menor degradación y desgaste, aumentando así la durabilidad y la eficiencia operativa a largo plazo de estos sistemas.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Se reconoce una serie de responsabilidades éticas que guiarán nuestras acciones y decisiones a lo largo del proceso. Estas responsabilidades son fundamentales para asegurar que los beneficios tecnológicos y ambientales del proyecto se maximicen, mientras que se minimizan los impactos negativos y se respetan los derechos de todas las partes involucradas.

Responsabilidad Ambiental: Nos comprometemos a utilizar tecnologías y prácticas que minimicen el impacto ambiental. Esto incluye la elección de materiales sostenibles y reciclables para la construcción de los rastreadores solares y la implementación de procesos que reduzcan las emisiones de carbono y otros contaminantes durante la instalación y operación de los sistemas fotovoltaicos.

Responsabilidad Social: Reconocemos la importancia de involucrar y beneficiar a las comunidades rurales en las que se implementarán los sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares. Esto implica realizar consultas con las comunidades locales, asegurando su participación activa en la planificación y ejecución del proyecto, y proporcionando capacitación y empleo local cuando sea posible.

Acceso Justo y Equitativo: Nos aseguramos de que los beneficios del proyecto sean accesibles para todas las comunidades rurales, sin discriminación de género, etnia o nivel socioeconómico. Esto incluye esfuerzos para que las comunidades más desfavorecidas tengan acceso prioritario a las mejoras en el suministro energético.

Transparencia y Rendición de Cuentas: Mantenemos un compromiso con la transparencia en todas las etapas del proyecto, desde la planificación hasta la implementación y evaluación. Proveeremos informes claros y accesibles sobre los objetivos, avances, desafíos y resultados del proyecto, y seremos responsables ante las comunidades locales, financiadores y otros actores interesados.

Sostenibilidad Económica: Aseguramos que el proyecto sea económicamente sostenible a largo plazo. Esto implica diseñar modelos de financiación y mantenimiento que permitan a las comunidades rurales gestionar y operar los sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares de manera autónoma y eficiente.

Integridad Técnica y Científica: Garantizamos que todas las decisiones técnicas y científicas se basen en datos precisos y evidencia sólida. Esto incluye el diseño y la implementación de los sistemas de rastreo solar de acuerdo con las mejores prácticas y estándares internacionales, y la realización de evaluaciones rigurosas para medir el impacto y la eficiencia de los sistemas.

Educación y Capacitación: Nos comprometemos a proporcionar educación y capacitación a las comunidades locales sobre el uso y mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares. Esto no solo asegura la sostenibilidad del proyecto, sino que también empodera a las comunidades con conocimientos y habilidades valiosas.

VII. CONCLUSIONES

El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

La eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

La capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

La orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.

VIII. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios específicos para personalizar el diseño de los rastreadores solares según las condiciones climáticas y geográficas particulares de cada región rural del Perú.
- Investigar y probar nuevos materiales y tecnologías que puedan aumentar la eficiencia y reducir los costos de los rastreadores solares.
- Explorar la integración de rastreadores solares con sistemas de almacenamiento de energía avanzados, como baterías de ion-litio de última generación o tecnologías emergentes de almacenamiento.
- Implementar sistemas de monitoreo y mantenimiento basados en datos que utilicen tecnologías IoT (Internet de las Cosas) y análisis de big data para prever fallos y optimizar el rendimiento de los rastreadores solares.
- Realizar estudios longitudinales para evaluar el impacto socioeconómico y ambiental a largo plazo de la implementación de rastreadores solares en las zonas rurales.
- Evaluar el potencial de tecnologías de seguimiento solar de próxima generación, como sistemas bifaciales o rastreadores de un eje con tecnología de seguimiento avanzada, para mejorar aún más la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en diversas condiciones climáticas.
- Promover la educación y capacitación continua sobre el uso y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares en comunidades rurales, para fortalecer la capacidad local de gestión y operación de estos sistemas de energía renovable.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. H. Carbajal, J. Márquez, V. Rodríguez y C. Galván. “Rastreador solar difuso para mejorar la obtención de energía eléctrica en paneles solares”. *Revista Polo del Conocimiento*, vol. 5, no. 10, pp. 37-51, octubre 2020.
- [2]. G. Nieto y D. Ramos. “Implementación de un módulo para el análisis de la trayectoria solar en paneles fotovoltaicos”. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2021.
- [3]. F. Riccio. “Seguidor solar a dos ejes cuya posición se calcula utilizando los ángulos de elevación y Azimut del sol en Guayaquil”. *Revista RECIMUNDO*, vol. 6, no. 1, pp. 225-231, enero 2022.
- [4]. A. Padilla, S. Chamba, E. Sarango y M. Jiménez. “Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para Aumentar el Rendimiento de Generación”. *Revista Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 4, pp. 232-263, abril 2022.
- [5]. J. Tovar. “Diseño e implementación de un sistema de tracking solar en dos ejes para la ciudad de Bogotá”. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Colombia, 2020.
- [6]. L. Parrilla y F. Prieto. “Factibilidad energética y económica de sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con seguidor solar para un cliente industrial en la región de Piura”. Tesis de Licenciatura en ingeniería Mecánica – Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Perú, 2023.
- [7]. J. Vidal. “Diseño de seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos”. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, 2022.
- [8]. J. Vidal. “Diseño de seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos”. Tesis de licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo, 2022.
- [9]. J. Mendoza; A. Aquino y C. Lindo. “Análisis de paneles fotovoltaicos en entornos de operación reales para determinar su eficiencia”. *Revista Prospectiva Universitaria*, vol. 19, no. 1, pp. 66-74, diciembre 2022.

- [10]. M. Pérez. "Diseño del colector solar térmico de un sistema híbrido PVT por modelamiento y simulación". Tesis de Doctorado en Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del centro del Perú, Junín, 2021.
- [11]. R. Souza, T. Castro y N. Rodrigues. "Rastreadores Solares: Uma Revisão Bibliográfica", *Revista XLIV International Sodebras Congress*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, agosto 2022.
- [12]. B. Tarazona, P. Hulse, L. Betancur y M. Duran. "Rastreadores solares como alternativa para mejorar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos descentralizados", *Revista de Unidades Tecnológicas de Santander*, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, mayo 2022.
- [13]. J. Nuñez [et al.]. "Metodología de diagnóstico de fallos para sistemas fotovoltaicos de conexión a red", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 17, no. 1, pp. 94-105, mayo 2020.
- [14]. K. Navarrete. "Análisis técnico-económico de un sistema fotovoltaico con influencia de suciedad, viento y lluvia en Arequipa-Perú". Tesis de Licenciatura en Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú, 2019.
- [15]. R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista. *Metodología de la Investigación*, 6ta ed. México: McGraw-Hill, 2014.

ANEXOS

ANEXO N.º 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TEMA: RASTREADORES SOLARES PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LAS ZONAS RURALES DEL PERÚ - 2024						
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
General:	General:	Principal:	VI Rastreador Solar	Eficiencia de seguimiento	% de seguimiento solar	TIPO DE INVESTIGACIÓN: Explicativo DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Cuasi experimental MÉTODO DE INVESTIGACIÓN: Mixto POBLACIÓN: La población estará conformada sistemas fotovoltaicos en zonas rurales. MUESTRA: La muestra será un conjunto representativo de los sistemas fotovoltaicos de las zonas rurales.
¿De qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?	Determinar de qué manera el rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	El rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.		Capacidad de carga	Potencia máxima soportada	
Específicos:	Específicos:	Secundarias		Orientación e inclinación	Angulo de seguimiento y ajuste	
¿De qué manera la eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?	Determinar de qué manera la eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	La eficiencia de seguimiento del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.		VD Sistema fotovoltaico	Eficiencia de Conversión	
¿De qué manera la capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?	Determinar de qué manera la capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	La capacidad de carga del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	Autonomía y almacenamiento		Capacidad de almacenamiento	
¿De qué manera la orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024?	Determinar de qué manera la orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	La orientación e inclinación del rastreador solar mejora el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales del Perú – 2024.	Sostenibilidad y Durabilidad		Vida útil del sistema	

ANEXO N.º 02: FICHA DE OBSERVACIÓN

Sistema fotovoltaico	Eficiencia de Conversión	Autonomía y almacenamiento	Sostenibilidad y Durabilidad
	Rendimiento energético	Capacidad de almacenamiento	Vida útil del sistema
1			
2			
.			
.			
.			
49			

ANEXO N.º 03: BASE DE DATOS

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS SIN RASTREADORES SOLARES

Sistemas fotovoltaicos sin rastreadores solares	Rendimiento energético por mes (Kwh)	Capacidad de almacenamiento (Kwh)	Vida útil del sistema (años)
1	5600	6000	29
2	7839	8399	20
3	10044	10761	20
4	10199	10928	20
5	3978	4262	17
6	5304	5683	18
7	6895	7388	26
8	10030	10746	21
9	7504	8040	22
10	1860	1993	19
11	11454	12272	24
12	3762	4031	23
13	8494	9101	18
14	3664	3926	26
15	3348	3587	26
16	14946	16014	19
17	8815	9445	25
18	12212	13084	17
19	4669	5003	19
20	12096	12960	24
21	5880	6300	18
22	2106	2256	17
23	2826	3028	22
24	4326	4635	17
25	13344	14297	28
26	13550	14518	23
27	5440	5829	24
28	3003	3218	20
29	7144	7654	19
30	8970	9611	27
31	7975	8545	28
32	1936	2074	22
33	12485	13377	24
34	4332	4641	16
35	5945	6370	17

36	8750	9375	23
37	6412	6870	25
38	6696	7174	21
39	10290	11025	28
40	8624	9240	25
41	4940	5293	16
42	8470	9075	22
43	10584	11340	23
44	6360	6814	26
45	7280	7800	19
46	2938	3148	17
47	5487	5879	24
48	8964	9604	17
49	6006	6435	16

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON RASTREADORES SOLARES

Sistemas fotovoltaicos con rastreadores solares	Rendimiento energético por mes (Kwh)	Capacidad de almacenamiento (Kwh)	Vida útil del sistema (años)
1	6258	6595	30
2	8764	8939	21
3	10958	11263	22
4	11067	11842	21
5	4804	5209	19
6	6302	6622	20
7	7798	8042	28
8	10532	11629	23
9	8336	8738	25
10	2454	2666	21
11	12165	12932	25
12	4397	4839	26
13	9282	9854	19
14	4297	4436	29
15	3862	4345	29
16	15463	16595	22
17	9641	10341	27
18	12786	13628	20
19	5303	5706	22
20	12950	13792	26
21	6772	6899	20
22	2739	2954	18
23	3763	3786	23
24	5040	5431	20
25	13915	15198	29
26	14507	15288	25
27	6320	6714	25
28	3848	3983	22
29	8124	8638	21
30	9791	10337	30
31	8970	9415	30
32	2648	2894	23
33	13246	14349	27
34	5234	5421	19
35	6684	7316	19
36	9367	10169	26

37	7067	7409	27
38	7196	7832	23
39	10800	11788	29
40	9385	9769	28
41	5558	5907	19
42	8983	9833	24
43	11257	11974	25
44	6986	7541	28
45	8260	8419	21
46	3710	3800	18
47	6358	6695	25
48	9498	10106	19
49	6995	7012	18