

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



ESCUELA DE POSGRADO

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

**RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
AUTÓNOMO DE 275 WP CON SEGUIDOR SOLAR DE
BAJO COSTO**

Autor: Bach. Mariños López Mas

Asesor: MSc. Fernando Isaac Espinoza Canaza

Registro:.....

CHACHAPOYAS – PERÚ

2022

DATOS DE ASESOR

Mg. Fernando Isaac Espinoza Canaza

DNI N° 00440560

Registro ORCID N° 0000-0002-6634-1970

<https://orcid.org/0000-0002-6634-1970>

Campos de la Investigación y el Desarrollo OCDE

1.05.00 -- Ciencias de la Tierra, Ciencias ambientales

1.05.08 -- Ciencias del medio ambiente

DEDICATORIA

Con gratitud e infinita mística a mis queridos padres:

*Simplicio Marino y Otilia ejemplos de sacrificio,
amor y dignidad, que me guiaron por la senda del bien, sujeto
a valores y principios en mi formación personal y profesional.*

*A mi adorada hija Joselyn Mehetabel, por estar a mi lado
mostrándome su cariño, dedicación, perseverancia y ser guía
en cada etapa de su formación académica y personal.*

*A vos, por todo el tiempo vivido y por vivir, mostrándome que
nada es difícil en la tapa de la vida, que todo se puede con amor,
paz y tranquilidad.*

Mariños.

AGRADECIMIENTO

A mi amada hija y adorados padres, hermanos por compartir momentos agradables y todo su apoyo incondicional.

A mis jurados mi agradecimiento más sincero por sus valiosas sugerencias que ayudaron a consolidar y culminar el presente proyecto de investigación afinando el contenido.

A mi asesor de tesis MSc. Fernando Isaac Espinoza Canaza, por su acertada dirección y valiosa colaboración para el desarrollo de esta investigación

Y a mi amigo Wildor Gosgot Angeles, por su valioso apoyo y aporte en la consolidación de esta investigación.

Mariños.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI
RECTOR

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
VICERRECTOR ACADÉMICO

Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

Dr. RAÚL RABANAL OYARCE
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE POSGRADO

**VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (x)/ DOCTOR ()**

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Rendimiento de un sistema Fotoroltaico Autónomo de 275 wp con seguidor solar de bajo costo.

cuyo autor Bach. Marinos López Mas es estudiante del _____ ciclo/egresado (x) de la Escuela de Posgrado, Maestría (x) / Doctorado () en gestión para el desarrollo sustentable, con correo electrónico institucional marinos-lopez.epg@untrm.edu.pe.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 30 de mayo de 2022


Firma y nombre completo del Asesor
Fernando Isaac Espinoza Graza

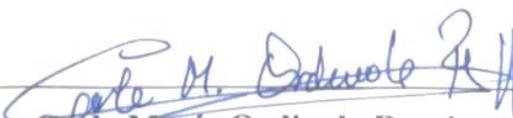
JURADO EVALUADOR



M.Sc. Segundo Manuel Oliva Cruz
Presidente



M.Sc. ELI PARIENTE MONDRAGON.
Secretario



Dra. Carla María Ordinola Ramírez

Vocal



ANEXO 6-0

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (x) / DOCTOR ()**

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Rendimiento de un sistema Fotovoltaico autónomo
de 275 wp con seguidor Solar de bajo costo.
presentada por el estudiante ()/egresado (x) Marinos López Mas
de la Escuela de Posgrado, Maestría (x) / Doctorado () en Gestión para el
Desarrollo sustentable
con correo electrónico institucional marinos.lopez.epa@untrm.edu.pe
después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 2.1 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (x) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.

Chachapoyas, 17 de Julio del 2022


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 6-Q

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO (X) / DOCTOR ()**

En la ciudad de Chachapoyas, el día 06 de Julio del año 2022 siendo las 16:00 horas, el aspirante Marinos López Mas, defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia () la Tesis titulada: Rendimiento de un sistema fotovoltaico autónomo de 275 WP con seguidor solar de bajo costo, para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor () en Gestión para el Desarrollo Sustentable, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, conformado por:

Presidente: Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz

Secretario: Mg.Sc. Eli Pariente Mondragón

Vocal: Dra. Carla María Ordinda Ramírez

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría (X)/Doctorado (), en términos de:

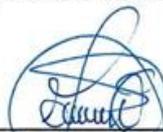
Aprobado (X)

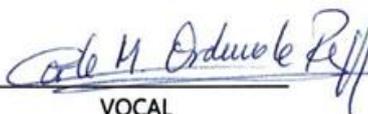
Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 16:00 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor ().


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

ÍNDICE GENERAL

DATOS DE ASESOR	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	iii
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	iv
JURADO EVALUADOR.....	vi
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS.....	vii
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS.....	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN	14
II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
2.1 Ubicación de la unidad de estudio	17
2.2 Unidad de estudio.....	17
2.3 Montaje de las unidades de estudio.....	20
2.4 Rendimiento de un sistema fotovoltaico con seguidor solar con un sistema convencional	25
2.5 Cálculo de rendimiento de los sistemas evaluados	26
2.6 Análisis económico de los sistemas fotovoltaicos	26
III. RESULTADOS	29
3.1 Instalación de los sistemas fotovoltaicos	29
3.2 Rendimiento de los sistemas fotovoltaicos	30
3.3 Estimación de generación de energías fotovoltaicos	33
3.4 Análisis económico del sistema	34
3.5 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)	36
IV. DISCUSIÓN	40
V. CONCLUSIONES	43
VI. RECOMENDACIONES.....	44
VII. REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del panel solar	19
Tabla 2. Producción de energía del sistema fotovoltaico con seguidor solar	33
Tabla 3. Producción de energía del sistema fotovoltaico estático	34
Tabla 4. Parámetros de costo del generador eléctrico.....	34
Tabla 5. Parámetros de cálculo de costo de sistema fotovoltaico con seguidor solar	34
Tabla 6. Parámetros de cálculo de costo de sistema fotovoltaico estático	35
Tabla 7. Costo de producción de energía.....	35
Tabla 8. Costo nivelado de energía.....	36
Tabla 9. Comportamiento de la TIR en los sistemas	36
Tabla 10. Comparación de rentabilidad económica.....	37
Tabla 11. Periodo de recuperación de la inversión	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los sistemas fotovoltaicos en el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva – INDESCES.	17
Figura 2. Unidades de estudio. A. Sistema fotovoltaico estático. B Sistema fotovoltaico con seguidor solar	18
Figura 3. Sistema fotovoltaico estático. A. composición del sistema. B. Panel solar de 275 Wp.....	18
Figura 4. Estructura del sistema fotovoltaico con seguidor solar.	19
Figura 5. Diseño del sistema fotovoltaico estático	20
Figura 6. Estructura de soporte del sistema estático	21
Figura 7. Sistema fotovoltaico armado	21
Figura 8. Diseño del sistema con seguimiento solar.....	22
Figura 9. Estructura de soporte para el sistema con seguimiento solar	22
Figura 10. Actuador lineal	23
Figura 11. Diagrama de instalación del sensor de seguimiento solar de un eje.....	23
Figura 12. Posicionamiento del actuador lineal y sensor solar.....	24
Figura 13. Sistema fotovoltaico con seguidor solar.....	24
Figura 14. Sistema fotovoltaico con seguidor solar.....	25
Figura 15. Software programado LABVIEW	25
Figura 16. Sistemas fotovoltaicos instalados in situ.	29
Figura 17. Comportamiento de potencia de salida de un día.....	30
Figura 18. Potencia y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.....	30
Figura 19. Comportamiento de la energía fotovoltaica respecto a la irradiación	31
Figura 20. Energía mensual acumulado de los sistemas fotovoltaicos.....	32
Figura 21. Eficiencia y rendimiento de los sistemas fotovoltaicos evaluados.....	32
Figura 22. Energía solar promedio mensual de los últimos 15 años en el área de estudio	33
Figura 23. Comportamiento del VAN con diferentes tasas de descuento	38

RESUMEN

La energía del sol es la más abundante, sostenible, renovable y libre de costo. Las células solares fotovoltaicas convierten la luz del sol directamente en electricidad por efecto fotoeléctrico. Para captar la radiación solar se utilizan paneles solares, estos pueden ser fijos o acoplados sobre seguidores solares, teniendo en cuenta que la potencia y orientación de la radiación solar varía según los factores y condiciones climáticas del lugar. Se diseñó y construyó un sistema de seguimiento solar que con la adhesión de un sensor solar es fácil de seguir la trayectoria del sol, donde se logra incrementar su eficiencia en la captación de energía solar. Por lo que, al acoplar un prototipo de seguidor al panel solar a un panel solar de 275 Wp, la energía generada en un día con irradiancia mayor al 4 kWh/m² genera en un rango de 01 a 1.65 kW día, siendo mayor al sistema fotovoltaico estático. Se evaluó la eficiencia del sistema fotovoltaico con seguidor solar y estático en términos energéticos, y se compararon los resultados tomando como grupo control al sistema estático. En la cual se concluye que la eficiencia energía generada por el sistema fotovoltaico con seguidor solar fue de 61.67% más respecto al sistema fotovoltaico fijo, con 1.5% de gasto energético para el funcionamiento, así como su viabilidad económica es superior al sistema estático.

Palabras claves: energía fotovoltaica; energía solar; seguidor solar; seguimiento en un eje.

ABSTRACT

The sun's energy is the most abundant, sustainable, renewable and free of cost. Photovoltaic solar cells convert sunlight directly into electricity by the photoelectric effect. To capture solar radiation, solar panels are used, these can be fixed or attached to solar trackers, taking into account that the power and orientation of solar radiation varies according to the factors and climatic conditions of the place. A solar tracking system was designed and built that, with the adhesion of a solar sensor, is easy to follow the path of the sun, where it is possible to increase its efficiency in capturing solar energy. Therefore, when coupling a solar panel tracker prototype to a 275 Wp solar panel, the energy generated in a day with irradiance greater than 4 kWh/m² generates in a range of 01 to 1.65 kW day, being greater than the system. static photovoltaic. The efficiency of the photovoltaic system with solar and static tracker was evaluated in energy terms, and the results were compared taking the static system as a control group. In which it is concluded that the energy efficiency generated by the photovoltaic system with solar tracker was 61.67% more than the fixed photovoltaic system, with 1.5% energy expenditure for operation, as well as its economic viability is superior to the static system.

Keywords: photovoltaic energy; solar energy; solar tracker; one-axis tracking.

I. INTRODUCCIÓN

Alrededor de la década de 1970, las fuentes de energía renovables comenzaron a convertirse en una alternativa a las energías tradicionales, debido a su disponibilidad inmediata y durabilidad garantizada, así como los niveles de contaminación son bajos e impacto ambiental nulo, razón que se les llama energías alternativas. Actualmente estas energías son un hecho, no una alternativa, por lo que en el pasado se han utilizado alternativas para utilizar el término renovable (Toranzo et al., 2015).

En la actualidad el desafío ambiental más importante es reducir el uso de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, así como la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera (GES). En particular, la generación de electricidad y calor representa una cuarta parte de las emisiones globales de GEI; al mismo tiempo, el pronóstico de las Naciones Unidas muestra un aumento significativo en el crecimiento de la población mundial, así como una tasa de consumo per cápita relacionada al consumo energético (De La Gala Contreras, 2018).

Para reducir el impacto negativo en la producción y el consumo de energía debido al aumento de la demanda, en los últimos años se ha incrementado el uso de tecnologías de generación de energía a partir de fuentes renovables, lo que contribuye al aumento de la producción mundial de energía (Ito et al., 2008). En este contexto, la generación de energía a través de sistemas fotovoltaicos es una de las mejores alternativas y la fuente más sustentable y rentable, ya que es de bajo costo, no tiene impacto ambiental, es confiable y se puede aplicar en diferentes lugares (Chatterjee et al., 2018).

Debido a ello, la generación de energía fotovoltaica es significativa en gran parte de las regiones del mundo y se espera que se fortalezca su crecimiento exponencial, desempeñando un papel importante en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las autoridades locales, gobiernos nacionales y acuerdos internacionales para cumplir con las reducciones de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Obeidat, 2018). En consecuencia, investigadores y la industria de la energía fotovoltaica están buscando

incesantemente tecnologías que pueden reducir los costos y aumentar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas (Green, 2016).

Existen diversas tecnologías fotovoltaicas, que cada día aumentan el rendimiento de conversión de los rayos solares en electricidad, siendo aún más sofisticadas en relación a los materiales utilizados y los sistemas de monitoreo (Peinado, Pliego, & García, 2020); conllevando, a mejorar la arquitectura de la celda FV; lo cual ha permitido el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas de primera, segunda y tercera generación. Las tecnologías de primera generación se basan en silicio monocristalino y multicristalino (c-Si), las tecnologías de segunda generación consisten en tecnologías de película delgada como silicio amorfo (a-Si), película delgada de silicio de múltiples uniones (a-Si / μ c-Si), telururo de cadmio (CdTe), (di) seleniuro de cobre e indio / (di) sulfuro (CIS) y (di) seleniuro / (di) sulfuro de cobre, indio, galio (CIGS) y por último las tecnologías de tercera generación incluyen concentradores fotovoltaicos, orgánicos entre otros (Alaaeddin et al., 2019).

De ahí que, el monitoreo y la evaluación del desempeño energético, económico y ambiental de los sistemas fotovoltaicos se han convertido en una tarea crucial, el cual depende del recurso solar junto con una tecnología fotovoltaica adecuada, la calidad del equilibrio de los componentes del sistema y los diseños adecuados; depende las horas que el sol incida sobre el panel solar, así como va depender de cada módulo que fueron instalados, la inclinación, orientación, la radiación solar que incide, la eficacia de la instalación y la potencia nominal (Mulcué-Nieto & Mora-López, 2014).

Según Tracker & Study, (2020), en un estudio que analiza la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, utilizando un seguidor solar de un solo eje realizado en el centro de Vietnam, demostraron que existe una gran diferencia en el tiempo de lectura es por la mañana y por la tarde, pero al mediodía la energía generada por los dos sistemas es muy similar. Por ejemplo, en un día soleado la energía máxima generada por la emisión fotovoltaica con el seguidor solar es de 1732Wh y el consumo de energía promedio del actuador lineal y el controlador es de 35Wh y la eficiencia del sistema fotovoltaico se mejora hasta en un 30,3% en

condiciones climáticas soleadas y un 15,2% en climas moderados, para un sistema de un solo eje utilizando un seguidor solar.

El presente estudio se han utilizado dos sistemas fotovoltaicos con seguidor solar y estático en la cual ambos utilizan paneles solares de 275 Wp, el sistema de seguimiento solar de un eje funcionó con un mecanismo automatizado para la operación óptima del sistema fotovoltaico. Se ha realizado una comparación de datos energéticos de cada sistema fotovoltaico instalado con seguidor y estático, con el fin de demostrar cuál de los sistemas presenta mejores eficiencias, bajo las condiciones de operación planteadas para los mismo; buscando de esta manera demostrar que el sistema fotovoltaico con seguidor solar permite un mayor aprovechamiento de la energía solar.

Por tal razón, la presente investigación se ha planteado como objetivo la evaluación del rendimiento de un sistema fotovoltaico autónomo de 275 Wp con seguidor solar de bajo costo, logrando demostrar mediante los objetivos específicos el diseño, construido y puesta en funcionamiento del sistema fotovoltaico con seguidor solar; así como la comparación en el rendimiento de ambos sistemas fotovoltaicos; para determinar la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos. Objetivos que conllevan mediante el estudio a incentivar el aprovechamiento de las energías renovables que son limpias y asequibles, así como a fortalecer las políticas nacionales y mundiales en gestión de energías renovables.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Ubicación de la unidad de estudio

Geográficamente la ejecución de la investigación, se ejecutó en la ciudad de Chachapoyas, en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza - Amazonas, de acuerdo a la siguiente coordenada $6^{\circ}13'46''S$ $77^{\circ}52'21''O$. Se encuentra a 2.4 Km de la ciudad de Chachapoyas, con temperatura promedio de $18^{\circ}C$, Humedad relativa de 86 %, altitud 2341 msnm (*SENAMHI - Perú, n.d.*). Los sistemas fotovoltaicos estudiados fueron instalados en la azotea del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES – CES).

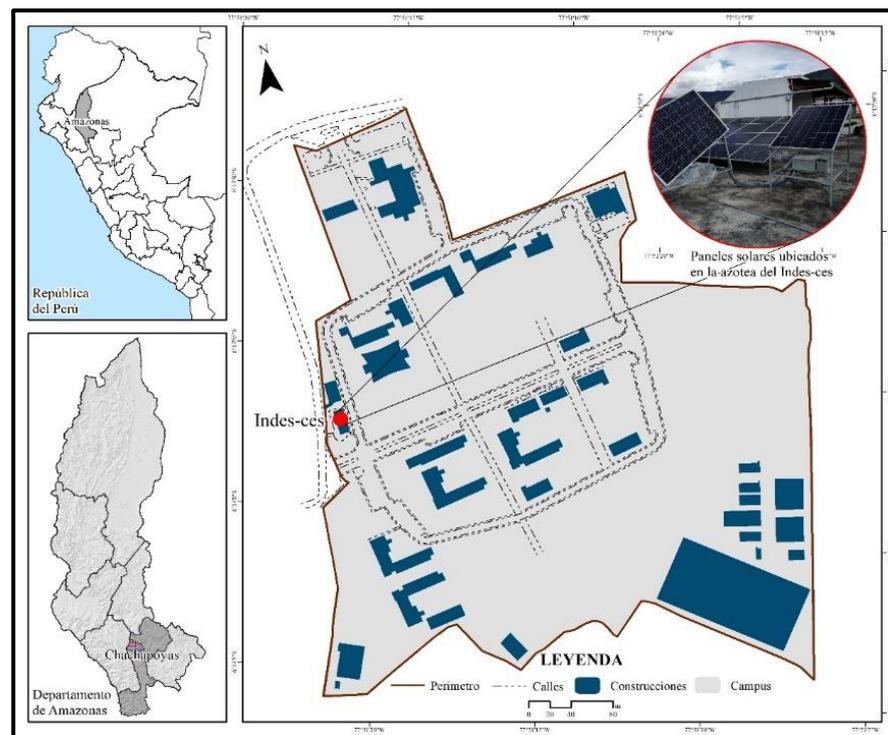


Figura 1. Ubicación de los sistemas fotovoltaicos en el Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva – INDESCES.

2.2 Unidad de estudio

En la investigación realizada se estudió dos tipos de sistemas fotovoltaicos, estático y con seguimiento solar, como se muestra a continuación figura 2, cuyas características se detallan a continuación.

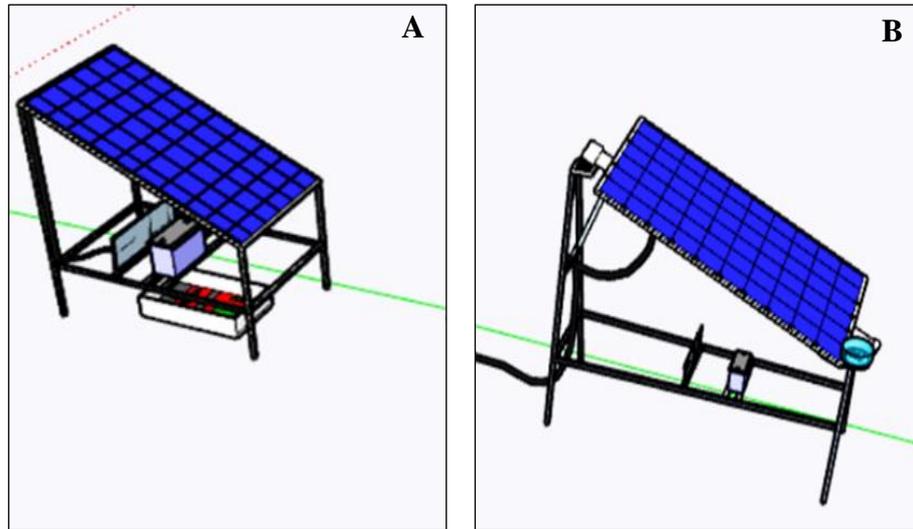


Figura 2. Unidades de estudio. A. Sistema fotovoltaico estático. B Sistema fotovoltaico con seguidor solar

a. Sistema fotovoltaico estático

El módulo sistema fotovoltaico estático está conformado (ver figura 3): un panel solar policristalino de 275Wp cuyas especificaciones técnicas se detallan en la tabla 1, un controlador de carga marca Sun Saver MPPT (Washington, Estados Unidos); inversor marca Gama AJ modelo AJ 275-12 y una batería de marca RITAR (Shenzhen, China) modelo RA12-100DG (12 V) encargada de almacenar toda la energía eléctrica generada por el panel solar 12v. Para la investigación se recolecto los datos exclusivamente del panel solar debido a que es el generador de la energía, mientras que el controlador y la batería se utilizó para el funcionamiento del sistema de recolección de datos.

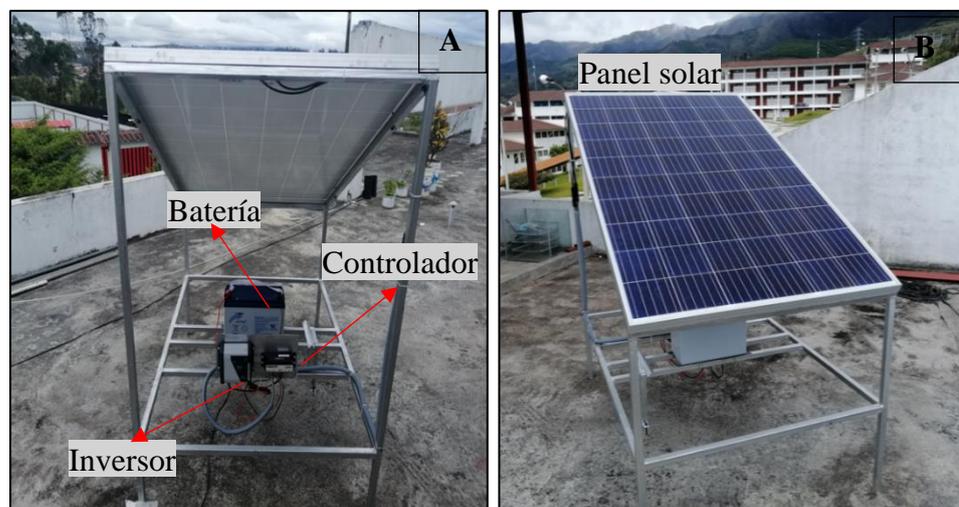


Figura 3. Sistema fotovoltaico estático. A. composición del sistema. B. Panel solar de 275 Wp.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del panel solar

CARACTERÍSTICAS	VALORES NOMINALES	
Potencia nominal	275.0	W(0/+5W)
Tensión nominal	31.0	V
Corriente nominal	8.88	A
Máximo serie fusible	15	A
Clase de aplicación		A
Circuito de voltaje	37.8	V
Corriente de corto circuito	9.36	A
Máximo voltaje de sistema	1000	V

b. Sistema fotovoltaico con seguidor solar

El módulo del sistema fotovoltaico con seguidor solar, está conformado por un panel de 275 Wp (figura 4) con las mismas especificaciones de la tabla 1; un controlador; un inversor; una batería de 12v; un actuador lineal y un sensor de seguimiento solar. Para la investigación se recolectó los datos exclusivamente del panel solar, debido a que es el generador de la energía; mientras que el controlador y la batería se utilizó para el funcionamiento del sistema de recolección de datos, mientras que el sensor de seguimiento solar juntamente con el actuador lineal para el accionamiento del sistema fotovoltaico.

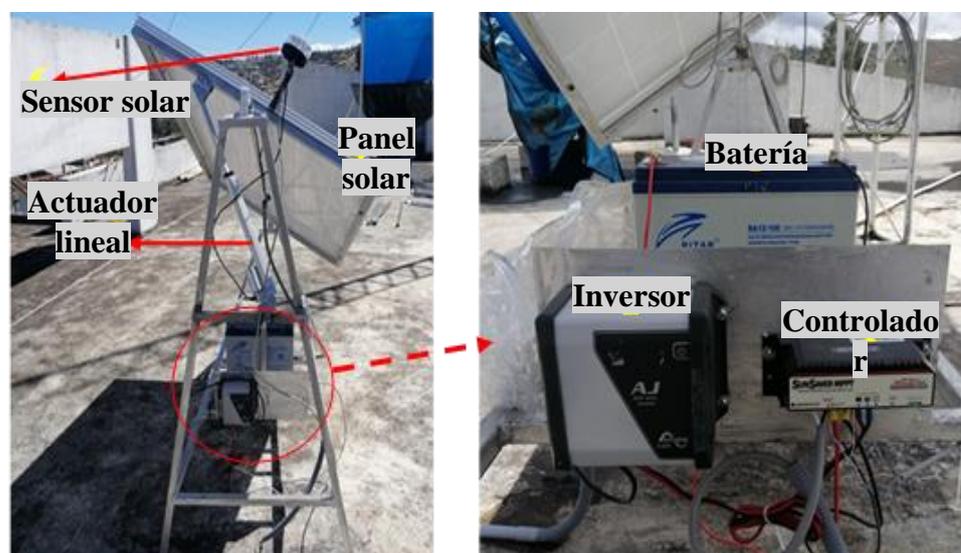


Figura 4. Estructura del sistema fotovoltaico con seguidor solar.

2.3 Montaje de las unidades de estudio

a) Montaje del sistema fotovoltaico estático

Primero se diseñó por medio del Software de modelado en 3D-SketchUp y se realizó la simulación de la estructura para darle mayor precisión y funcionalidad en su operatividad, tal como se puede visualizar en la siguiente figura, se muestra el sistema con todos los componentes que conforman el sistema fotovoltaico estático.

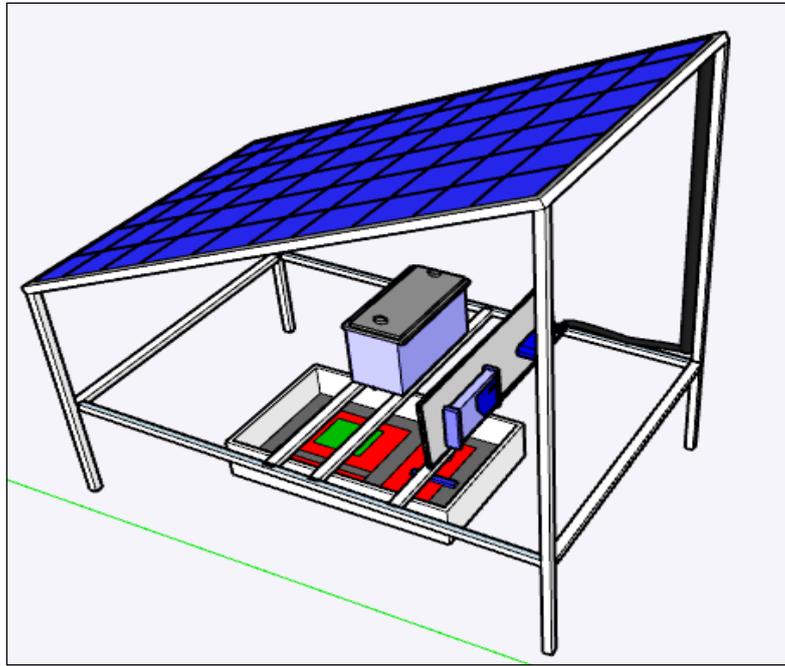


Figura 5. Diseño del sistema fotovoltaico estático

Con el diseño se procede a la construcción de la estructura metálica del sistema fotovoltaico estático. En la estructura, se utilizó un elemento soporte de acero rectangular 20x30x2.0 mm, las cuales son plegables para una mejor estabilidad, las uniones de las partes se realizaron mediante soldadura mecánica; considerando un ángulo de inclinación de 20° para una mejor posición para la captación de la radiación, tal como se observa en la siguiente figura.



Figura 6. Estructura de soporte del sistema estático

Seguidamente con la estructura metálica de soporte del panel solar se pasó a realizar el montaje, fijando el panel solar de 275 Wp juntamente con sus accesorios y equipos tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 7. Sistema fotovoltaico armado

b) Montaje de sistema con seguidor solar

Tal como se realizó el diseño para el sistema estático, se aplicó el mismo procedimiento para el diseño y construcción del sistema con seguimiento solar,

con la diferencia que lleva un sistema de giro de este a oeste para el acoplamiento del sensor solar tal como se muestra en la siguiente en la figura.

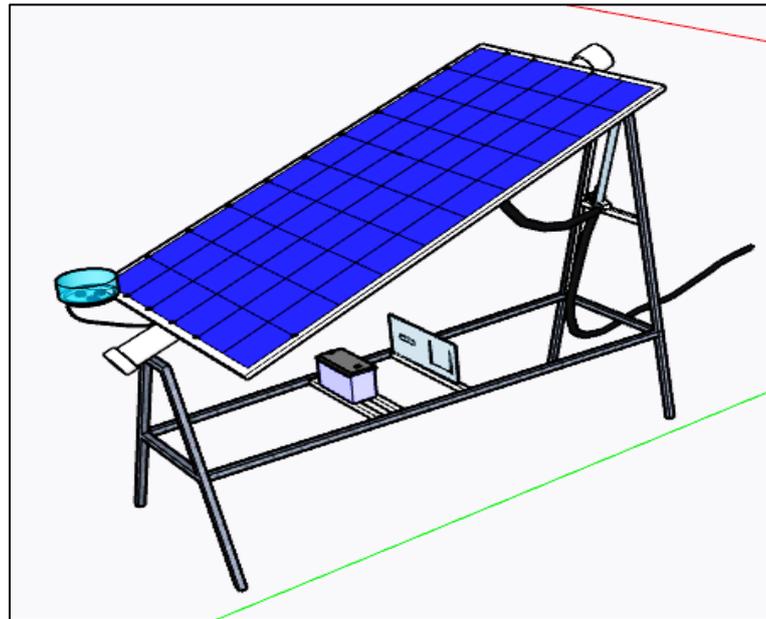


Figura 8. Diseño del sistema con seguimiento solar

La estructura de soporte principal del panel solar cuenta con un mecanismo de giro de plano horizontal en dirección de este - oeste y viceversa. El mecanismo está compuesto por una barra de acero 1018 PTR 50.8 mm de 1.20 m de largo, fijado al centro de la estructura con adhesión a una chumaceras y rodajes, tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 9. Estructura de soporte para el sistema con seguimiento solar

El sistema con seguidor solar, para su accionamiento se ha instalado un actuador lineo (figura 10) de marca Eco worthy y modelo PA-14-1-150. El actuador lineal es un dispositivo mecánico un tornillo sin fin que trabaja convirtiendo el movimiento rotatorio del motor en movimiento de tracción, empuje lineal o recto.



Figura 10. Actuador lineal

Después de implementar los elementos descritos anteriormente se procedió a incorporar el módulo de seguimiento solar (figura 11), para emitir las señales de movimiento en acorde a la traslación del sol. El sensor de seguimiento solar utilizado es de modelo MK III de un solo eje, funciona con corriente continua de 12 VCC con un margen de error de $\pm 20\%$, además, utiliza un puente electrónico (H-Bridge) que impulsa el motor en cualquier dirección, es decir, en sentido horario/antihorario, izquierda/derecha o arriba/abajo según la ubicación del sol.

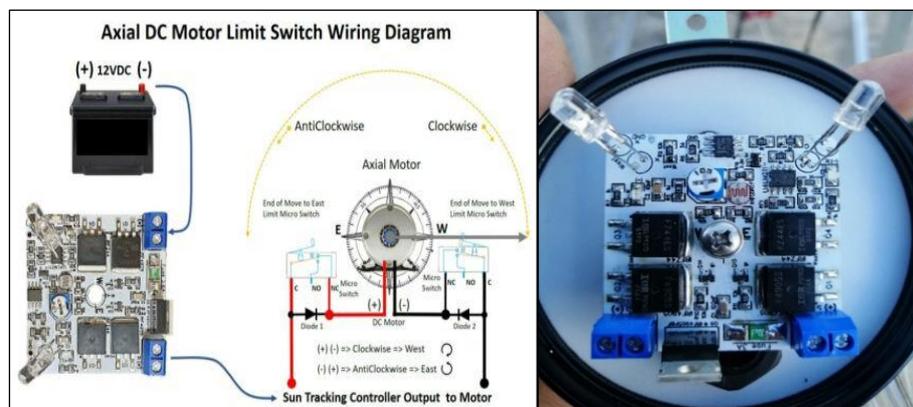


Figura 11. Diagrama de instalación del sensor de seguimiento solar de un eje

c) Instalación del seguidor solar y del actuador lineal

El mecanismo de seguimiento solar es accionado por el actuador lineal que es controlado por el sensor solar. El sensor solar se ubicó en la parte superior del panel solar, fijado en el extremo superior tal como se muestra en la siguiente figura.

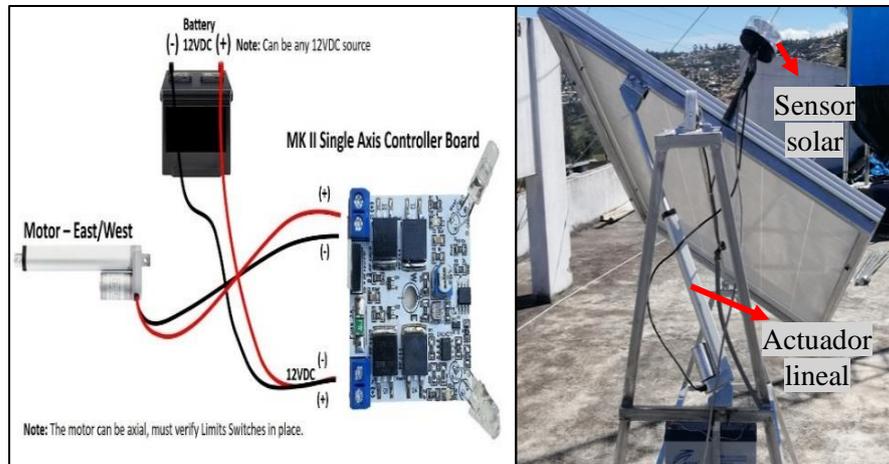


Figura 12. Posicionamiento del actuador lineal y sensor solar

Finalmente se realizó el calibrado del sensor solar con el actuador lineal para su correcto movimiento de acuerdo a la trayectoria del sol, tal como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Sistema fotovoltaico con seguidor solar

2.4 Rendimiento de un sistema fotovoltaico con seguidor solar con un sistema convencional

Para la evaluación del rendimiento del sistema fotovoltaico se recolecto variables eléctricas y ambientales las cuales son: voltaje, amperaje, temperatura y radiación solar respectivamente. Para ello se ha empleado un sistema de adquisición de datos desarrollado por Carhuavilca et al., (2021), como se muestra en la figura 14, este sistema transmite los datos a un software programado LABVIEW para su visualización y almacenamiento (figura 15). La recolección de datos se llevó en el periodo de enero a marzo de 2022, desde 6:00 a 19:00 horas.

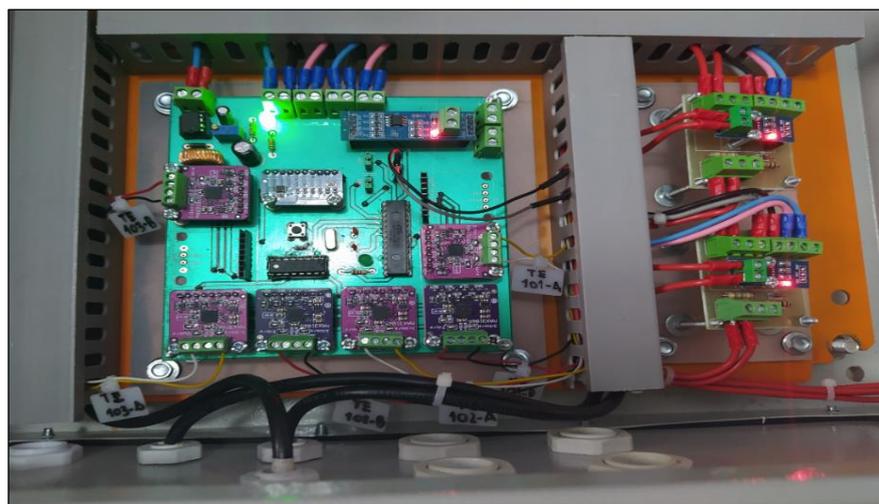


Figura 14. Sistema fotovoltaico con seguidor solar

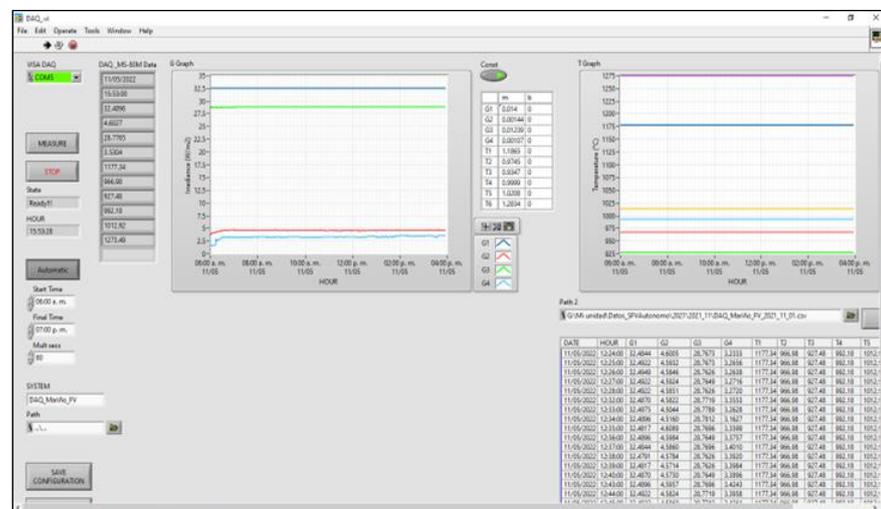


Figura 15. Software programado LABVIEW

2.5 Cálculo de rendimiento de los sistemas evaluados

Para el cálculo del rendimiento de ambos sistemas evaluados, del registro de datos de corriente (A) y voltaje (V), se procedió a calcular en simultaneo la potencia tal como lo aplico el autor (López et al., 2018), con la siguiente formula.

$$P = VI \quad (1)$$

Donde:

P = Potencia eléctrica (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente Eléctrica (A)

Para determinar la eficiencia energética se utilizó la fórmula 2, la que está incluida en la norma internacional ISO 50001 sobre sistemas de gestión de la energía, publicada en agosto de 2018 por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO - ISO 50001:2018 - *Sistemas de Gestión de La Energía — Requisitos Con Orientación Para Su Uso*, n.d.)

$$\text{Resultado energetico} = \frac{\text{Resultado}}{\text{Entrada total de energia} * \text{Irradiación}} \quad (2)$$

Donde:

Resultado = Potencia generada por el panel fotovoltaico (W)

Entrada total de energía = Potencia máxima del panel fotovoltaico (W)

2.6 Análisis económico de los sistemas fotovoltaicos

El análisis económico del sistema fotovoltaico nos permite verificar si la instalación proyectada en el tiempo será lo suficientemente rentable. Este análisis está fundamentado en el comportamiento en los siguientes parámetros: valor presente neto, tasa interna de rentabilidad y costo nivelado de energía.

a) Valor Presente Neto (VPN)

Es la metodología más conocida a la hora de evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El VPN permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero; permite determinar si dicha inversión puede incrementar o reducir el valor del proyecto. Según Beltran & Salcedo, (2016) la metodología consiste en descontar al momento actual, actualizando mediante una tasa, todos

los flujos de efectivos futuros del proyecto. Al valor se le resta el presupuesto inicial de la inversión, de tal manera que el resultado obtenido es el valor presente neto del proyecto. Y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$VPN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Qn}{(1+r)^n} \quad (3)$$

Donde Qn representa los flujos de caja, I es el valor del desembolso inicial de la inversión, n es el número de años considerados y r es la tasa de descuento a la cual se van a descontar los flujos efectivos.

b) Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es uno de los métodos de evaluación de proyectos de inversión más utilizados para demostrar la rentabilidad y viabilidad de una inversión. La TIR se ha calculado igualando el VAN a cero, mediante la siguiente ecuación:

$$VPN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Qn}{(1+r)^n} = 0 \quad (4)$$

Donde r es igual a la TIR.

c) Costo nivelado de electricidad

El costo nivelado de la electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) es una importante medida empleada para determinar y comparar el costo de la electricidad producida por varias tecnologías y fuentes. Según Branker et al. (2011) el calculando el LCOE requiere considerar el costo del sistema de generación de energía y la energía generada durante su vida útil para proporcionar un costo en \$/kWh. Muchos han notado que la metodología LCOE es muy sensible a los supuestos de entrada, como que es habitual realizar un análisis de sensibilidad para dar cuenta de cualquier incertidumbre.

Cabe señalar que la suma el cálculo parte de $t = 0$ para incluir el costo del proyecto al inicio del primer año que no se descuenta y no hay sistema la producción de energía se degradará. Por lo tanto, el estudio ha comparado ambas tecnologías alternativas mediante el costo nivelado estimado de la electricidad en unidades de kWh y se calcula mediante la fórmula de LCOE.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{Ct}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

Donde, T costo de la inversión, t años, C_t costo neto para el proyecto, r tasa de descuento para t , E_t energía producida.

Para tener como referencia el costo de generación de 1 kW de energía solar fotovoltaica de tipo aislada a la red se comparó con un generador a gasolina, este sistema viene a ser la alternativa más próxima que se utiliza en la actualidad. Las características del generador a gasolina son: 950W 2T GG920 modelo GG 950, cuya potencia nominal es de 950 W, y capacidad de consumo de combustible es de un galón cuya operación es por 4 horas aproximadamente, lo cual para la demanda eléctrica solo de noche se requiera alrededor de 3 galones por semana.

III. RESULTADOS

3.1 Instalación de los sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, estático y con seguimiento solar fueron instalados en la azotea del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, para su puesta en funcionamiento se realizó la prueba del sensor solar en la transferencia de señal al actuador lineal para el accionamiento del sistema, seguidamente se procede a ubicar en paralelo a ambos sistemas en orientación de sur a norte de tal manera que ambos tengan la misma cantidad de incidencia de radiación solar, mismos eventos climatológicos y además libres de sombra.

El sistema fotovoltaico con seguidor solar por su diseño está trabajando como barrera a la trayectoria del viento, por tal razón se ha fijado en la plataforma para evitar su remoción por la fuerza del viento tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 16. Sistemas fotovoltaicos instalados in situ.

3.2 Rendimiento de los sistemas fotovoltaicos

a. Evaluación de un día

La siguiente figura, muestra la evaluación del día 01 de enero de 2022, tomando como resultado inicial la evaluación del comportamiento de la potencia de cada sistema, donde se visualiza que el sistema fotovoltaico con seguidor solar toma gran ventaja en la generación de electricidad frente al sistema fotovoltaico estático, en la cual se observa que desde el punto 1.7 kWh a 2.50 kWh el sistema con seguimiento adquiere una potencia constante frente al sistema estático.

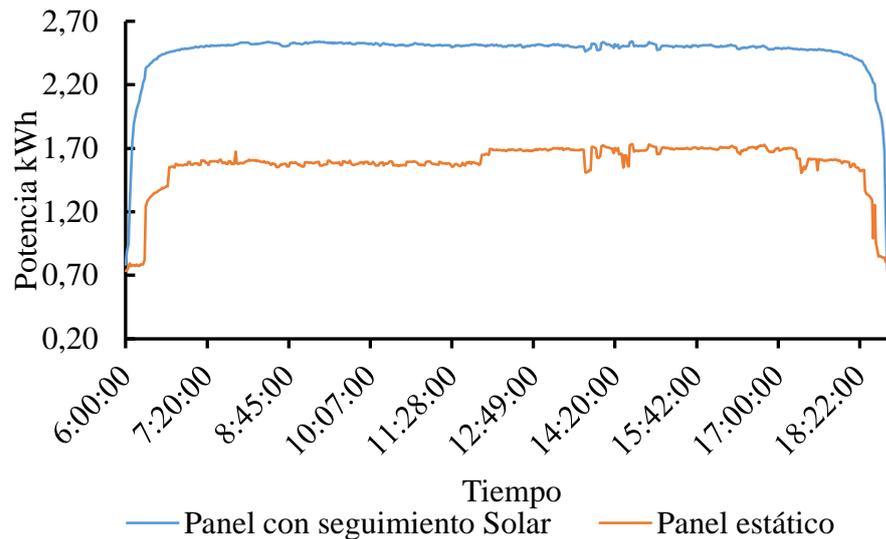


Figura 17. Comportamiento de potencia de salida de un día

Mientras que en la siguiente figura 18, se muestra que el sistema fotovoltaico con seguidor solar durante el día de evaluación adquiere un 56 % de eficiencia

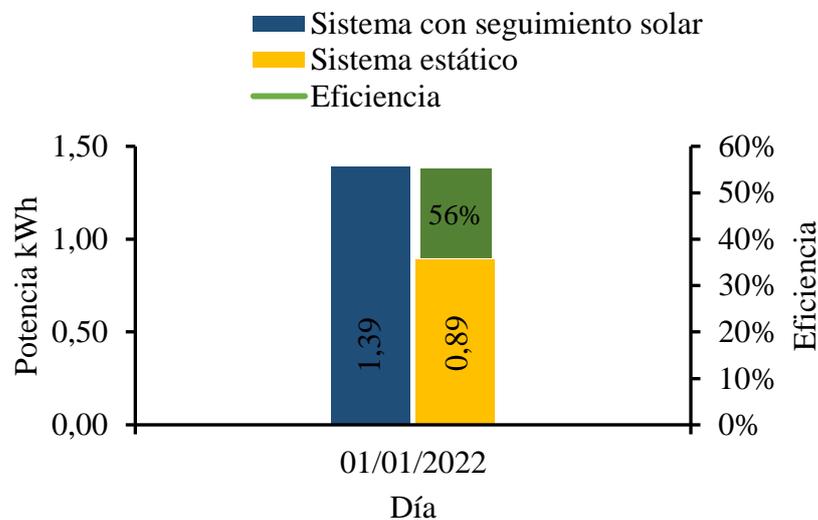


Figura 18. Potencia y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos

sobre el sistema fotovoltaico estático; generando 1.39 kWh de energía eléctrica frente al sistema estático con un 0.89 kWh.

b. Evaluación por mes del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos

En la siguiente figura, muestra la generación de energía entre el periodo enero a marzo, en la cual se observa que el sistema fotovoltaico con seguidor solar genera mayor electricidad frente al sistema fotovoltaico estático.

Así mismo el comportamiento frente a la irradiancia solar, se evidencia que la potencia generada de los sistemas fotovoltaicos tiene una relación directa con la variación de la irradiancia, donde el sistema con seguimiento solar es más pronunciado.

De esta manera mediante la figura 20, se muestra que el mes de febrero tiene un resultado más bajo de 37.74 kWh de energía eléctrica y un 23.20 kWh el estático, con una presencia de irradiancia de 159.65 kWh/ m²; así mismo el mes con mayor potencia es el mes de enero, con un 43.03 kWh de energía eléctrica y un 26.82 kWh, con una irradiancia de 207.51 kWh/m².

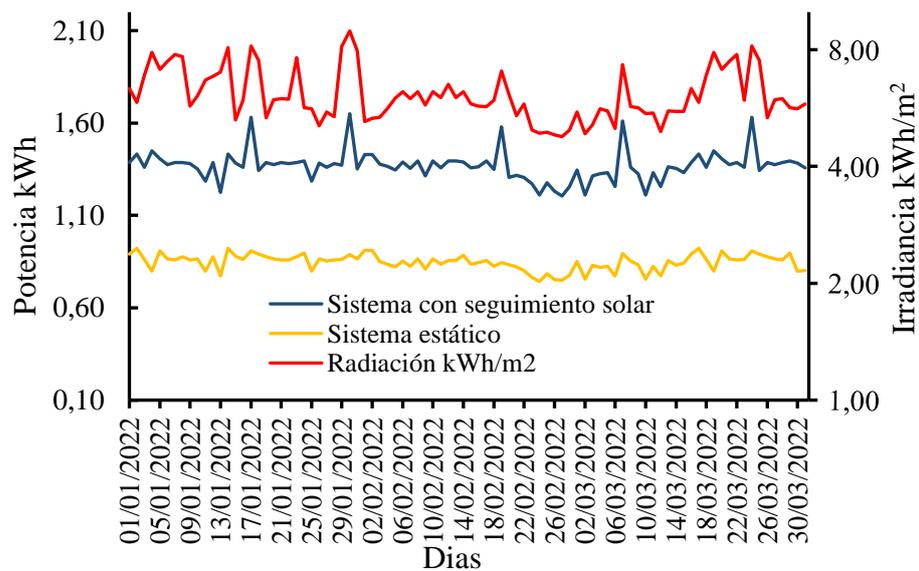


Figura 19. Comportamiento de la energía fotovoltaica respecto a la irradiación

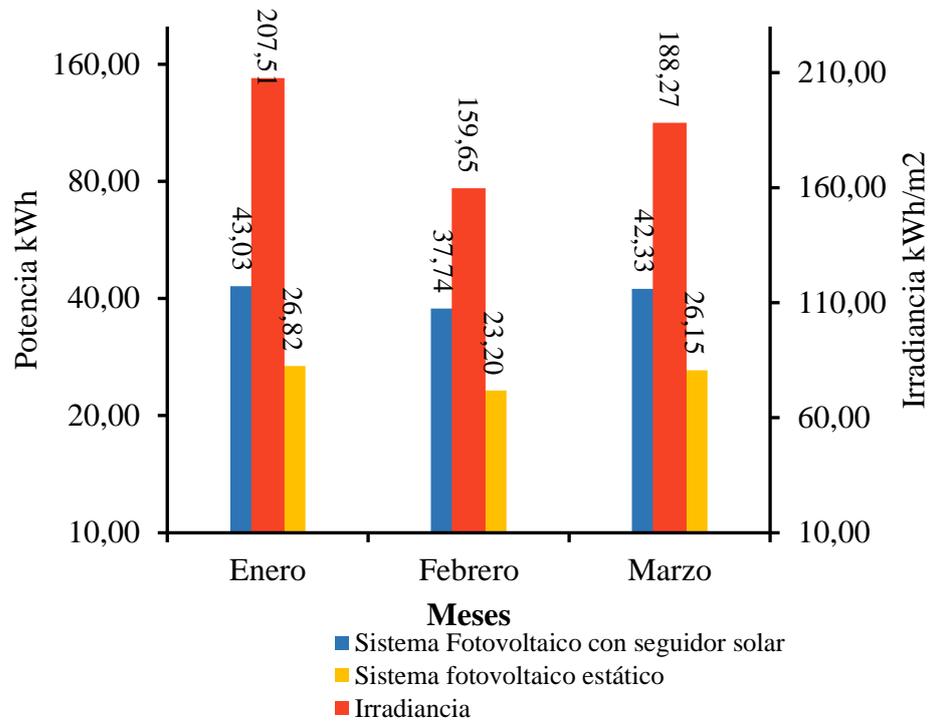


Figura 20. Energía mensual acumulado de los sistemas fotovoltaicos

En ese sentido de acuerdo a la figura 21, se muestra el resultado de tres meses de evaluación, mostrando la comparación de la potencia generada en ambos sistemas mediante el rendimiento porcentual, donde el sistema con seguimiento solar tiene una potencia acumulada de 123.10 kWh de generación de energía eléctrica y un 76.18 kWh el sistema estático, lo que implica que el sistema con seguimiento solar en un 61.67% es más eficiente.

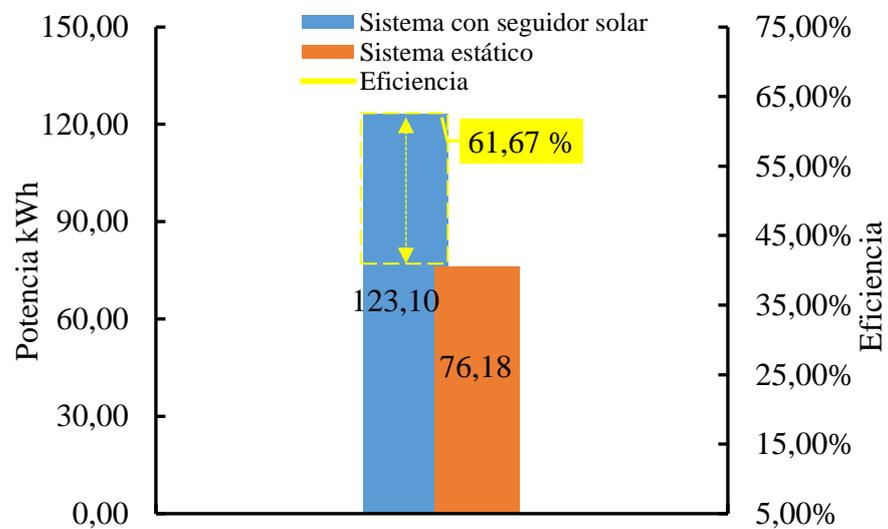


Figura 21. Eficiencia y rendimiento de los sistemas fotovoltaicos evaluados

3.3 Estimación de generación de energías fotovoltaicos

Para realizar el análisis económico y rentabilidad del sistema se va tener en cuenta la distribución de la energía solar en el área de estudio, en donde se analiza los 15 años según la irradiación solar mensual (kWh/m²), dato obtenido de la plataforma software PVgis (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.2). El PVGIS es la herramienta en línea gratuita que es ideal para estimar la energía solar incidente sobre un lugar específico y la producción de electricidad solar de un sistema fotovoltaico (PV) para América, Asia, Europa y África.

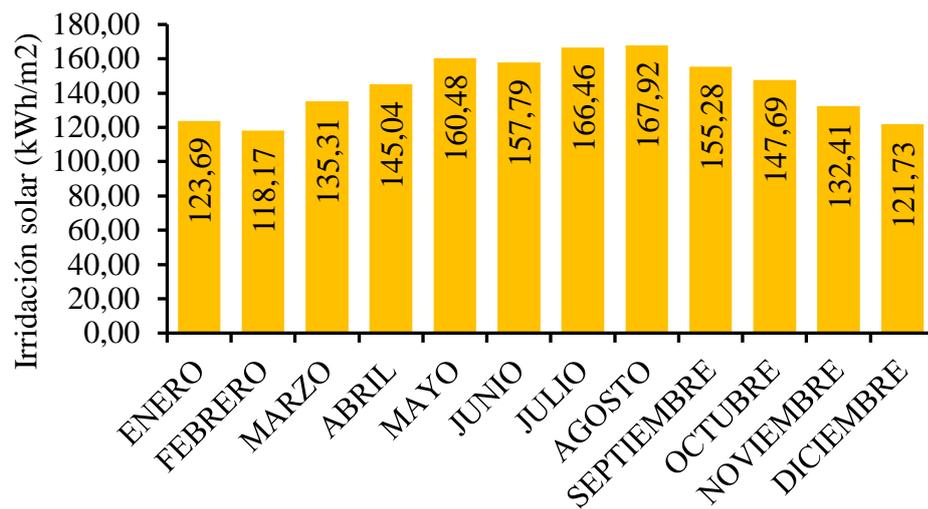


Figura 22. Energía solar promedio mensual de los últimos 15 años en el área de estudio

La figura 22, muestra un seguimiento de 15 años de irradiación en el lugar de estudio, el mes de febrero ha existido menos irradiación solar, en base a esta información se realiza la proyección de producción de energía del sistema fotovoltaico evaluado; tomando como base la producción de energía del mes de febrero.

Tabla 2. Producción de energía del sistema fotovoltaico con seguidor solar

Periodo	Energía kWh
Febrero	37.74
Año	452.88

Tabla 3. Producción de energía del sistema fotovoltaico estático

Periodo	Energía kWh
Febrero	23.20
Año	278.4

3.4 Análisis económico del sistema

- Costo nivelado de energía

Para el costo nivelado de energía se ha considerado que la inversión es cubierta por el usuario, no se requiere un préstamo de un banco. Para la evaluación se ha tenido en cuenta las condiciones de una vivienda de zona rural la cual está compuesta por su cocina, dos cuartos y patio, así como también el funcionamiento de algunos artefactos eléctricos como televisor y cargador de celular, en ese contexto para el funcionamiento de todo lo indicado se requiere contar con una mínima energía fotovoltaica acumulada diaria de 340 W, al mes sería de 10,2 kWh. Una alternativa para cubrir esta demanda de energía se podrá utilizar un generador eléctrico de dos tiempos con las condiciones mínimas de potencia de 950 W, que se encuentra en el mercado nacional.

Tabla 4. Parámetros de costo del generador eléctrico

Descripción	Unidad	Valor \$
Generador de 950 w	1	190
Operación y mantenimiento mensual	global	50
Total		\$ 240

Tabla 5. Parámetros de cálculo de costo de sistema fotovoltaico con seguidor solar

Descripción	Unidad	Valor \$
Panel solar 275 wp	01	313.1
Inversor 12Vdc	01	60
Controlador Sun Saver MPPT	01	40
Batería RA12-100DG	01	246

Accesorios	global	10
Estructura metálica	01	65
Actuador lineal	01	20
Seguidor solar de un eje	01	18
Total		\$ 772.1

Tabla 6. Parámetros de cálculo de costo de sistema fotovoltaico estático

Descripción	Unidad	Valor \$
Panel solar 275 wp	01	313.1
Inversor 12Vdc	01	60
Controlador Sun Saver MPPT	01	40
Batería RA12-100DG	01	246
Accesorios	global	10
Estructura metálica	01	65
Total		\$ 734.1

Tabla 7. Costo de producción de energía

Costos	Sistema fotovoltaico con seguidor solar	Sistema fotovoltaico estático	Generador a gasolina
Equipo + instalación	\$ 772.10	734.10	\$/ 190
Operación (mensual)	\$ 0	\$ 0	\$/ 50
Tiempo de garantía	Panel solar, controlador e inversor: 20 años Batería: 3 años Vida Útil panel: 25 años		

En la siguiente tabla, se muestra el costo nivelado de energía, donde se logra ver que la energía solar fotovoltaica es menor en comparación a un generador a gasolina. Este cálculo se realizó teniendo en cuenta la vida útil de la batería de 3 años

Tabla 8. Costo nivelado de energía

Sistema de generación eléctrica	Energía eléctrica demandada por 3 años	Costos de operación y mantenimiento por 3 años	Costo nivelado de energía
Sistema con seguidor solar	1358 kWh	\$. 772,10	0,59 \$/ kWh
Sistema fotovoltaico estático	835,2 kWh	\$. 734,10	0,89 \$/ kWh
Generador a gasolina	367 kWh	\$. 1,990.00	5,42 \$/kWh

**Tipo de cambio de dólar a S/. 3,66 del 26 de mayo de 2022.*

3.5 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

En la tabla 9 se evidencia que el sistema fotovoltaico con seguidor solar tiene una mayor confiabilidad obteniendo un TIR de 29%, así mismo el sistema con seguimiento solar es la segunda opción de viabilidad económica con un TIR de 24%, con respecto al sistema de generador a gasolina es totalmente lo contrario, se muestra que la TIR es menor a cero lo que implica que este sistema no es lo recomendable para su implementación.

Tabla 9. Comportamiento de la TIR en los sistemas

Sistemas	TIR
Con seguimiento solar	29%
Sistema Estático	24%
Generador a gasolina	-22%

a. Análisis de económica por tasa de descuento

En la tabla 10, se visualiza que con inversión propia el VAN del sistema con seguidor y sistema estático es positivos, así mismo para el generador a gasolina los resultados son adverso en su rentabilidad, de igual manera para el sistema con seguimiento solar a una tasa de descuento de 29% punto máximo de inversión, el VAN se comporta con una viabilidad y rentabilidad económica mínima, mientras que el sistema estático a un 24% la rentabilidad mínima es positiva y para el sistema convencional generador a gasolina en ninguna de las condiciones de tasa de descuento genera rentabilidad económica.

Tabla 10. Comparación de rentabilidad económica

Tasa Dto.	VAN sistema con seguidor solar	VAN generador eléctrico	VAN sistema estático
0,0%	\$ 4.918,69	\$ -5.990,75	\$ 3.765,90
0,5%	\$ 4.564,87	\$ -5.636,93	\$ 3.486,11
1,0%	\$ 4.241,07	\$ -5.313,13	\$ 3.230,07
1,5%	\$ 3.944,34	\$ -5.016,41	\$ 2.995,43
2,0%	\$ 3.672,06	\$ -4.744,12	\$ 2.780,12
2,5%	\$ 3.421,87	\$ -4.493,94	\$ 2.582,29
3,0%	\$ 3.191,68	\$ -4.263,75	\$ 2.400,27
3,5%	\$ 2.979,61	\$ -4.051,69	\$ 2.232,57
4,0%	\$ 2.783,98	\$ -3.856,05	\$ 2.077,87
4,5%	\$ 2.603,27	\$ -3.675,35	\$ 1.934,98
5,0%	\$ 2.436,13	\$ -3.508,20	\$ 1.802,81
5,5%	\$ 2.281,33	\$ -3.353,41	\$ 1.680,41
6,0%	\$ 2.137,80	\$ -3.209,88	\$ 1.566,90
6,5%	\$ 2.004,52	\$ -3.076,60	\$ 1.461,52
7,0%	\$ 1.880,62	\$ -2.952,71	\$ 1.363,54
7,5%	\$ 1.765,30	\$ -2.837,38	\$ 1.272,35
8,0%	\$ 1.657,82	\$ -2.729,90	\$ 1.187,36
8,5%	\$ 1.557,53	\$ -2.629,61	\$ 1.108,05
9,0%	\$ 1.463,83	\$ -2.535,91	\$ 1.033,96
9,5%	\$ 1.376,19	\$ -2.448,28	\$ 964,66
10,0%	\$ 1.294,12	\$ -2.366,21	\$ 899,77
10,5%	\$ 1.217,18	\$ -2.289,26	\$ 838,92
11,0%	\$ 1.144,96	\$ -2.217,04	\$ 781,81
11,5%	\$ 1.077,09	\$ -2.149,18	\$ 728,15
12,0%	\$ 1.013,25	\$ -2.085,33	\$ 677,67
12,5%	\$ 953,12	\$ -2.025,21	\$ 630,12
13,0%	\$ 896,44	\$ -1.968,52	\$ 585,30
13,5%	\$ 842,94	\$ -1.915,03	\$ 542,99
14,0%	\$ 792,40	\$ -1.864,48	\$ 503,03
14,5%	\$ 744,60	\$ -1.816,69	\$ 465,23
15,0%	\$ 699,34	\$ -1.771,43	\$ 429,45
15,5%	\$ 656,46	\$ -1.728,55	\$ 395,54
16,0%	\$ 615,79	\$ -1.687,88	\$ 363,38
16,5%	\$ 577,17	\$ -1.649,26	\$ 332,84
17,0%	\$ 540,48	\$ -1.612,57	\$ 303,82
17,5%	\$ 505,57	\$ -1.577,66	\$ 276,22
18,0%	\$ 472,34	\$ -1.544,43	\$ 249,94
18,5%	\$ 440,68	\$ -1.512,77	\$ 224,90
19,0%	\$ 410,48	\$ -1.482,57	\$ 201,03
19,5%	\$ 381,66	\$ -1.453,75	\$ 178,24
20,0%	\$ 354,13	\$ -1.426,22	\$ 156,47
20,5%	\$ 327,81	\$ -1.399,90	\$ 135,65
21,0%	\$ 302,63	\$ -1.374,72	\$ 115,74
21,5%	\$ 278,52	\$ -1.350,61	\$ 96,68
22,0%	\$ 255,41	\$ -1.327,51	\$ 78,41
22,5%	\$ 233,26	\$ -1.305,36	\$ 60,89

23,0%	\$	212,01	\$	-1.284,10	\$	44,08
23,5%	\$	191,60	\$	-1.263,69	\$	27,94
24,0%	\$	171,98	\$	-1.244,08	\$	12,44
24,5%	\$	153,13	\$	-1.225,22	\$	-2,47
25,0%	\$	134,99	\$	-1.207,08	\$	-16,82
25,5%	\$	117,52	\$	-1.189,61	\$	-30,63
26,0%	\$	100,70	\$	-1.172,79	\$	-43,94
26,5%	\$	84,48	\$	-1.156,57	\$	-56,76
27,0%	\$	68,84	\$	-1.140,93	\$	-69,13
27,5%	\$	53,75	\$	-1.125,84	\$	-81,06
28,0%	\$	39,17	\$	-1.111,27	\$	-92,59
28,5%	\$	25,09	\$	-1.097,19	\$	-103,72
29,0%	\$	11,49	\$	-1.083,58	\$	-114,48
29,5%	\$	-1,67	\$	-1.070,42	\$	-124,88

Finalmente, para ver el comportamiento de la viabilidad económica de los sistemas evaluados en la figura 23, muestra al VAN a diferentes valores de tasa de descuento, logrando el sistema fotovoltaico con seguidor solar logra sobresalir más en el rendimiento económico frente a los dos sistemas estático y generador a gasolina, a un 29% los escenarios de tasa de descuento, los valores son positivos, aún después de 20 años de operación del sistema. También se observa que a tasas de descuento del orden de 0 a 100% el generador a gasolina el VAN en todos los escenarios es negativo, lo que es un indicador para no invertir.

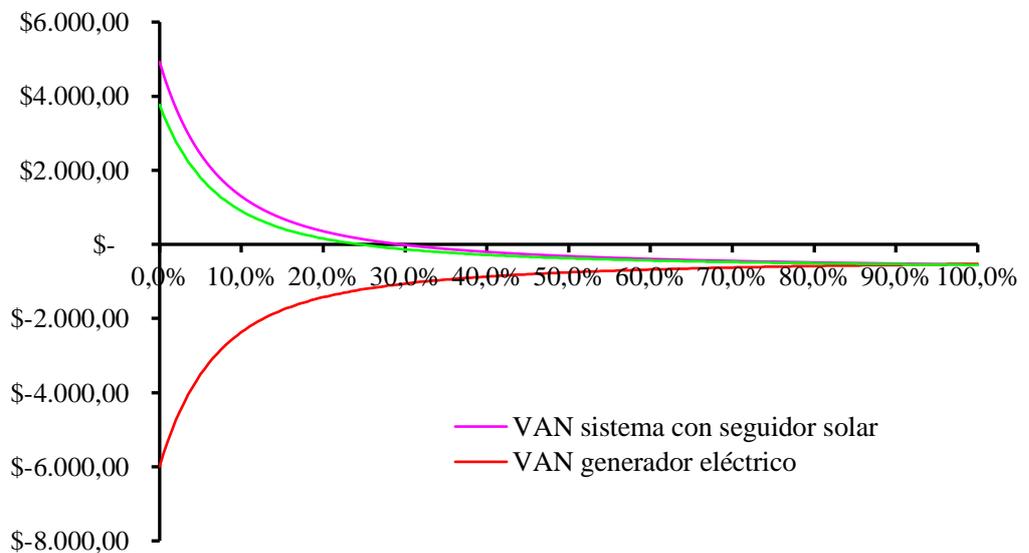


Figura 23. Comportamiento del VAN con diferentes tasas de descuento

Tabla 11. Periodo de recuperación de la inversión

PERIODO (AÑO)	TOTAL ANUAL	ACUMULADO
0	772,1	772,1
1	600	1372,1
2	600	1972,1
3	600	2572,1
4	600	3172,1
5	600	3772,1

El periodo de recuperación de la inversión se realiza en el primer año de su funcionamiento, por lo que el sistema fotovoltaico en comparación al sistema de un generador eléctrico a gasolina es totalmente viable y económica.

IV. DISCUSIÓN

En las últimas décadas, los sistemas fotovoltaicos estáticos tienen gran utilidad, pero en la actualidad, con el adelanto tecnológico e innovación, la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se está incrementando con la utilización de los sistemas de seguimiento solar de un solo eje y de dos ejes que ayudan en el posicionamiento del panel solar en la trayectoria del sol de acuerdo con la estación y hora del día (Hara et al., 2021). Los sistemas de seguimiento solar es un aparato tecnológico que cumple una función de aumentar la producción de energía de los sistemas fotovoltaicos (Pelayo et al., 2018), dando un mejor rendimiento en la producción de energía eléctrica por la incidencia de los rayos solares sobre los paneles fotovoltaicos.

Por tal razón en la presente investigación se construyó una infraestructura metálica para un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de un solo eje de bajo costo, se ha utilizado materiales e insumos que son accesibles en la nuestra comunidad, con excepción de la tarjeta de toma de datos, actuador lineal y sensor de seguimiento solar que son parte del análisis, esta decisión fue en respuesta a la poca accesibilidad a estos equipos a utilizar que hubieran elevado el costo de construcción, pero minimizo enormemente la mano de obra así como el tiempo que tomo la construcción de la infraestructura del panel fotovoltaico.

Según López et al., (2018) en su investigación propuso una estructura metálica que soporta al sistema fotovoltaico con seguidor solar que fue construido en material tubular de metal, con ángulos de metal y perfil tubular rectangular; ayudando de esta manera a la firmeza de la estructura; así mismo Contreras, (2018) en la ciudad de Tacna desarrollo una infraestructura mecánica con accesorios y materiales propios de la zona de investigación, del mismo modo en la presente investigación se utilizó materiales propios de la zona, con la diferencia de los soportes tanto al sistema de control de movimiento como al de transmisión fueron construidos en acero inoxidable más liviano, para su fácil maniobra.

En ese contexto, los materiales y forma de la estructura de soporte del sistema fotovoltaico estático y sistema con seguidor solar, las estructuras metálicas cuentan con un ángulo de inclinación de 20° y con posicionamiento fijo a la plataforma de agarre tal como Taheri et al., (2021) en su investigación logra

implementar, donde en el proceso de funcionamiento los sistemas fotovoltaicos con seguidor solar y estático, ha tenido como resultado una gran resistencia a la fuerza del viento.

Instalado el sistema fotovoltaico con seguidor solar se procedió a realizar la comparación del rendimiento frente al sistema fotovoltaico estático, tal como Liu et al., (2021) realiza la comparación en su investigación; en esta etapa se evidenció que la radiación solar ha desempeñado un factor fundamental para la demostración de la eficiencia de ambos sistemas fotovoltaicos, y de acuerdo a lo indicado en su investigación Arreola G. & Quevedo, (2015) la intensidad de la radiación solar, la orientación de cada sistema fotovoltaico y ángulo de inclinación, así como los tipos de módulos fotovoltaicos e inversor, son factores que influyeron en la eficiencia de cada sistema fotovoltaico.

Por lo que la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos con seguidor solar es mucho mayor que el sistema estático, resultado similar a lo adquirido por Barbosa de Melo, (2022) en su investigación donde logra demostrar en su evaluación de sistemas fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos una ganancia considerable en la generación de energía eléctrica; a su vez se observa cómo alcanza valores elevados con rapidez frente al sistema estático. Por lo que en esta investigación se logra un 61.67% de eficiencia del sistema con seguidor solar en un panel de 275 Wp policristalino, generando una alternativa a la rentabilidad energética a través de los sistemas fotovoltaicos.

En la actualidad contar con la disponibilidad de un servicio de alumbrado dentro del domicilio en las zonas rurales es difícil por lo disperso de los domicilios y altos costos que acarrea el cableado, por tal razón una de las opciones convencionales más inmediatas es la adquisición de un generador eléctricos a diésel o gasolineros que generan niveles muy significativos de contaminantes que tienen efectos irreversibles y negativos tanto a la humanidad como al medio ambiente (Fadlallah, 2021). Mediante esta investigación se muestra que la opción de contar con un sistema amigable al medio ambiente y sencillo de instalar se puede obtener energía constante y económico con los sistemas fotovoltaicos (Rebolledo et al., 2022); sin embargo, se tiene que tener en cuenta que, el dispositivo de mayor sensibilidad es la batería por lo que se debe tener en cuenta

las características y especificaciones técnicas para las cargas máximas que deben soportar, para minimizar las pérdidas económicas al no tener en cuenta las características técnicas.

En ese sentido, mostrar que tan viable económicamente es cada sistema, es fundamental para su rentabilidad demostrando mediante el análisis VAN y TIR, para Rebolledo et al., (2022) indican que la factibilidad económica y rentabilidad está relacionado y en función al análisis del Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y el Costo Nivelado de la Energía (LCOE); en ese sentido Sapag, (2018) indica que si el VAN es mayor a cero la rentabilidad es positiva, considerando que el proyecto es rentable en términos económicos, así como la TIR es superior a cero se obtiene una superior rentabilidad exigida a la inversión.

Los resultados obtenidos para los sistemas fotovoltaicos con seguidor solar y estático, muestran un VAN de \$ 4,918.69 y un TIR de 29%, así mismo el sistema estático, un VAN de \$ 3.765,90 y un TIR de 24%, lo que demuestra que son superiores a cero y de acuerdo a Sapag, (2018) tienen viabilidad y rentabilidad económica, en cuanto al costo nivelado de energía (LCOE) este se encuentra por debajo del precio convencional de energía por un generador a gasolina (\$/kWh) consumida por los hogares en promedio en las zonas rurales de la Región Amazonas demostrando su factibilidad económica positiva.

Finalmente, los resultados obtenidos se puede comparar con otras investigaciones, en Brasil mediante la investigación de Barbosa de Melo et al., (2022) logran obtener un rendimiento del sistema fotovoltaico con seguimiento solar de un 20% teniendo en cuenta las condiciones climáticas e instalación del sistema con un panel solar policristalino, mientras que en el desierto del Sahara mediante la investigación de Khadidja et al., (2014) obtienen un rendimiento de 15% con relación al sistema fijo; así mismo en la ciudad de Tacna De La Gala Contreras, (2018) en su investigación logra una eficiencia de 2.45% en promedio con un panel fotovoltaico policristalino. En la presente investigación se logró una eficiencia de 61.67%, siendo superior a las investigaciones por la razón que se utilizó una infraestructura más estable y fácil de maniobrar por el sensor solar, así mismo los sistemas fueron sometidos a las condiciones climáticas diferentes a las investigaciones anteriores; el estudio se desarrolló en la ciudad de Chachapoyas.

V. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó un sistema de seguimiento solar y un sistema estático, compuesto por una estructura metálica, se utilizó un elemento soporte de acero rectangular 20x30x2.0 mm para ambos sistemas, las cuales son plegables para una mejor estabilidad al sistema, también consta de un panel solar policristalino de 275Wp, un controlador de carga; inversor y una batería y para el sistema con seguimiento solar se adhiere un actuador lineal y un sensor de seguimiento solar.
- De la comparación de los sistemas fotovoltaicos con seguidor solar y estático se concluye que la potencia generada por el panel fotovoltaico policristalino de 275 Wp con seguidor solar se logra una eficiencia de 61.67% frente al sistema estático, con una diferencia energética de 46.92 kWh durante el proceso de evaluación incluso en las condiciones más adversas, como días nublados y con presencia de lluvias.
- Finalmente, de acuerdo al costo nivelado de energía, se obtiene que los sistemas fotovoltaicos, tanto el sistema con seguimiento solar y estático, es 9 veces menor a un generador a gasolina. En consecuencia, el sistema fotovoltaico con seguidor solar es más eficiente en la generación de energía eléctrica en comparación al sistema estático, por lo que es viable técnica y económicamente, donde el sistema con seguimiento solar logra un VAN de \$ 4,918.69 y un TIR de 29%, así mismo el sistema estático, logra un VAN de \$ 3.765,90 y una TIR de 24%, ambos sistemas con una tasa de interés de 0%, con periodo de recuperación de la inversión en el primer año; en cuanto sistema generador a gasolina tiene comportamiento negativo.
- Es la primera investigación realizada en la región Amazonas, cuyos resultados ayuda al cierre de brechas, al acceso de energía y la electrificación rural, conllevando a una mejor calidad de vida de las personas, buscando un desarrollo sustentable y sostenible de los pueblos alejados del sistema de electrificación nacional.

VI. RECOMENDACIONES

- Implementar el sistema en paneles fotovoltaico de segunda y tercera generación para comparar la eficiencia entre los paneles fotovoltaicos.
- Instalar el sistema fotovoltaico con un seguidor solar de doble eje y comparar la eficiencia frente a un seguidor solar de un solo eje.
- Utilizar el actuador lineal de acuerdo a carga de movimiento para reducir los costos.
- Implementar con sensor de seguimiento solar a módulos fotovoltaicos existentes en la universidad
- Evaluar la influencia de sombra y polvo en el rendimiento del panel solar tanto con seguimiento y estático.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaaeddin, M. H., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & AL-Oqla, F. M. (2019). Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *102*(October 2018), 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.026>
- Arreola G., R., & Quevedo, A. (2015). Diseño , construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico . = Design , construction and evaluation of a solar tracking system for a photovoltaic ... *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(April 2016), 1715–1727.
- Barbosa de Melo, K., Kitayama da Silva, M., Lucas de Souza Silva, J., Costa, T. S., & Villalva, M. G. (2022). Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil. *Renewable Energy Focus*, *41*, 179–187. <https://doi.org/10.1016/J.REF.2022.02.005>
- Beltran, N., & Salcedo, M. T. (2016). *Analisis Economico De Un Sistema Fotovoltaico Conectado a La Red En Arequipa*. *11*, 14–19. <http://cer.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2017/10/12.pdf>
- Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4470–4482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>
- Carhuavilca, A. M., Conde, L. A., Berastain, A. E., Montes-Romero, J., Gosgot, W., De La Casa, J., Tofflinger, J. A., & Catao, M. A. (2021). Monitoring system based on IEC standards for irradiance and module temperature measurements in photovoltaic systems. *Journal of Physics: Conference Series*, *1841*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1841/1/012002>
- Chatterjee, S., Kumar, P., & Chatterjee, S. (2018). A techno-commercial review on grid connected photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*(March), 2371–2397. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.045>
- De La Gala Contreras, A. (2018). *Implementación de un Seguidor Solar para la Evaluación Energética Comparativa de Paneles Fotovoltaicos*.
- Fadlallah, S. (2021). *Determination of the optimal solar photovoltaic (PV) system for Sudan*. September 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.041>
- Green, M. A. (2016). Commercial progress and challenges for photovoltaics. *Nature Energy*, *1*(1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.15>
- Hara, K., Akitomi, M., Wilson, G. M., Al-jassim, M., Lindig, S., & Theristis, M. (2021). *Monitoring system based on IEC standards for irradiance and module temperature measurements in photovoltaic systems* Monitoring system based on IEC standards for irradiance and module temperature measurements in photovoltaic systems. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1841/1/012002>
- ISO - ISO 50001:2018 - *Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso*. (n.d.). Retrieved May 9, 2022, from <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- Ito, M., Kato, K., Komoto, K., Kichimi, T., & Kurokawa, K. (2008). A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV)

- systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(1), 17–30.
<https://doi.org/10.1002/pip.770>
- Khadidja, B., Dris, K., Boubeker, A., & Nouredine, S. (2014). Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian region , Example of Ouargla. *Energy Procedia*, 50, 610–618.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.075>
- Liu, Z., Zhang, Y., Yuan, X., Liu, Y., Xu, J., Zhang, S., & He, B. jie. (2021). A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127240.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127240>
- Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2014). A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries. *Solar Energy*, 107, 423–442. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.030>
- Obeidat, F. (2018). A comprehensive review of future photovoltaic systems. *Solar Energy*, 163(July 2017), 545–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.050>
- Peinado Gonzalo, A., Pliego Marugán, A., & García Márquez, F. P. (2020). Survey of maintenance management for photovoltaic power systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134, p. 110347). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110347>
- Pelayo López, J. A., Luna Soto, A., Bernabe Ramos, F., & Guzmán Flores, B. (2018). Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo / Comparison between a photovoltaic solar tracker efficiency and a fixed photovoltaic system. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 105–129.
<https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.76>
- Rebolledo, F., Mendoza-Araya, P., Carvajal, G., & Ramírez, G. (2022). Performance evaluation of different solar modules and mounting structures on an on-grid photovoltaic system in south-central Chile. *Energy for Sustainable Development*, 68, 65–75. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2022.02.003>
- Sapag Chain, N. (2018). *Preparación y evaluación de proyectos*. www.FreeLibros.me
- SENAMHI - Perú. (n.d.). Retrieved May 28, 2022, from <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Taheri, A., Malayjerdi, M., Kazemi, M., Kalani, H., Nemati-Farouji, R., Passandideh-Fard, M., & Sardarabadi, M. (2021). Improving the performance of a nanofluid-based photovoltaic thermal module utilizing dual-axis solar tracker system: Experimental examination and thermodynamic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117178.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117178>
- Toranzo, N. M., Cervantes, A. L., Henríquez, J., & Costa, O. E. (2015). Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar ; Solar tracker, optimizing ofimprovementof the solar energy. *Ingeniería Energética*, 36(2), 190–199.Tracker, S. S., & Study, C. (2020). *Grid-Connected Photovoltaic Systems with*.