

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO MEDIANTE SISTEMAS
DISCRETOS DE SEGUIMIENTO SOLAR EN LOS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS DE LA UNSAAC 2025**

PRESENTADO POR:

Br. WUESLY OMAR MAITA USCAMAITA
Br. JESUS ANGEL MANYA CAIRO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

Dr. Ing. JOSÉ WILFREDO CALLASI QUISPE

CUSCO – PERÚ
2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** José Wilfredo Callasi Quispe
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:
Análisis del rendimiento energético mediante sistemas discretos de
seguimiento solar en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC 2025
.....

Presentado por: Wlesly Omar Maíta Uscamaita DNI N° 72420651 ;
presentado por: Jesús Angel Manya Cairo DNI N°: 72889021
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Electricista

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 10 de Julio de 20..26.....

.....
Firma

Post firma Dr. José Wilfredo Callasi Quispe

Nro. de DNI 23812797

ORCID del Asesor 0000-0003-0714-4499

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:606466342

7_Manya Jesus_Maita Wuesly_tesis_final_empastado.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:606466342

167 páginas

Fecha de entrega

8 jul 2026, 8:17 p.m. GMT-5

23.470 palabras

120.825 caracteres

Fecha de descarga

8 jul 2026, 8:29 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

7_Manya Jesus_Maita Wuesly_tesis_final_empastado.pdf

Tamaño del archivo

4.1 MB

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
136 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo incondicional en todos estos años de mi formación profesional, a mis hermanos por ser el motivo de mi superación, a mi pareja por su fiel compañía en todo este tiempo así mismo a mis amigos por el aliento incondicional

Wuesly Omar Maita Uscamaita.

A mis padres, Washington Manyá Zavaleta y Aida Maribel Cairo Callo, pilares invaluable de mi camino, cuyo esfuerzo cotidiano sostuvo cada uno de mis pasos en mi formación. A mis hermanos, Carlos y Nieves, por ser inspiración constante y recordarme que la dedicación también nace del hogar.

A mi abuelita Aidee, quien supo escuchar incluso aquello que no siempre pude decir en voz alta. Y estas últimas líneas son para quien confió en mí desde mis primeros pasos. Tu confianza me sostuvo incluso cuando ya no estabas. Este trabajo lleva tu sueño y tu nombre, Danae.

Jesus Angel Manyá Cairo.

AGRADECIMIENTO

A los docentes de nuestra querida escuela profesional de Ingeniería Eléctrica por las enseñanzas brindadas en las sacrosantas aulas de nuestra tricentenaria Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

A los compañeros de aula que compartieron sus conocimientos, por su ayuda y por los momentos tan agradables que pasamos juntos.

Y por último a nuestros familiares que siempre están velando porque seamos hombres de bien y buenos profesionales para la sociedad y por la confianza que siempre nos demostraron.

Wuesly Omar Maita Uscamaita.

Jesus Angel Many Cairo.

RESUMEN

La presente investigación se orienta a la evaluación del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos mediante la incorporación de un sistema discreto de seguimiento solar en las instalaciones fotovoltaicas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). En este contexto, el estudio analiza la influencia del seguimiento solar discreto en la generación de energía eléctrica, tomando como referencia un sistema fotovoltaico fijo de operación convencional.

Para el desarrollo del estudio, se llevó a cabo un diagnóstico del comportamiento energético del sistema fotovoltaico fijo, seguido del modelado y la simulación de un sistema discreto de seguimiento solar. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo del desempeño energético de ambos sistemas. El modelado se efectuó a partir de un perfil de irradiancia solar, a partir del cual se implementó un modelo energético en el entorno de simulación MATLAB.

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema discreto de seguimiento solar favorece un mayor aprovechamiento del recurso solar durante el transcurso del día, lo que se traduce en un incremento de la irradiación captada y, en consecuencia, en una mayor producción de energía eléctrica.

En conclusión, los resultados del estudio permiten afirmar que la implementación de sistemas discretos de seguimiento solar constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC, bajo las condiciones de análisis consideradas.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, Seguimiento solar discreto, Rendimiento energético, Irradiancia solar, Simulación en Matlab

ABSTRACT

This research aims to evaluate the energy performance of photovoltaic systems by incorporating a discrete solar tracking system into the photovoltaic installations at the National University of San Antonio Abad in Cusco (UNSAAC). In this context, the study analyzes the impact of discrete solar tracking on electricity generation, using a conventional fixed photovoltaic system as a reference.

To conduct the study, an assessment of the energy performance of the fixed photovoltaic system was carried out, followed by the modeling and simulation of a discrete solar tracking system. Subsequently, a comparative analysis of the energy performance of both systems was performed. The modeling was based on a solar irradiance profile, which was used to implement an energy model in the MATLAB simulation environment.

The results obtained show that the discrete solar tracking system facilitates greater utilization of solar energy throughout the day, which translates into increased solar irradiance and, consequently, higher electricity production.

In conclusion, the study's results confirm that the implementation of discrete solar tracking systems constitutes a technically viable alternative for improving the energy performance of UNSAAC's photovoltaic systems under the conditions analyzed.

Keywords: Photovoltaic system, Discrete solar tracking, Energy yield, Solar irradiance, MATLAB simulation

INDICE GENERAL

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.1.1. Problema Principal	18
1.1.2. Problemas Específicos.....	18
1.2. Justificación.....	19
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo General	20
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. Alcance.....	21
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	22
2.1. Antecedentes.	22
2.1.1. Antecedentes internacionales	22
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	23
2.2. Fundamentos Teóricos	25
2.2.1. Energía Solar fotovoltaica	25
2.2.2. Sistemas fotovoltaicos fijos.....	26
2.2.3. Componentes de un sistema fotovoltaico fijo	27
2.2.4. Sistemas de seguimiento solar	28
2.2.5. Sistemas de seguimiento discreto.....	29

2.2.6. Tipos de seguimiento discreto	30
2.2.7. Componentes principales de un sistema de seguimiento solar	31
2.2.8. Modelo matemático de sistemas de seguimiento solar	33
2.2.9. Matlab	34
2.2.10. Simulink	34
2.3. Efecto fotovoltaico	35
2.4. Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.	36
2.5. Radiación solar	38
2.6. Irradiancia Solar	40
2.7. Irradiación solar	40
2.7.1. Irradiancia global	41
2.7.2. Irradiancia directa.....	42
2.7.3. Irradiancia difusa.....	42
2.8. Curva tensión -corriente	43
2.9. Curva de potencia.....	44
2.10. Simulación horaria de rendimiento energético.....	45
2.11. Temperatura del módulo fotovoltaico	47
2.12. Eficiencia del módulo fotovoltaico	47
2.13. Potencia eléctrica instantánea.....	48
2.14. Energía eléctrica diaria generada	48

CAPITULO 3: METODOLOGÍA	50
3.1. Tipo de Investigación	50
3.2. Diseño de la Investigación:	51
3.3. Materiales y Equipos:	52
3.4. Procedimiento Experimental:	53
3.5. Recopilación de Datos:	53
3.6. Plan de análisis de Datos	54
3.7. Matriz de Consistencia	56
3.8. Operacionalización de variables.....	57
CAPITULO 4: DIAGNOSTICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	58
4.1. Sistema de generación distribuida Ingeniería Eléctrica	58
4.2. Eficiencia energética en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC	59
4.3. Energía diaria generada.....	60
CAPITULO 5: MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE LA UNSAAC	78
5.1. Sistema fotovoltaico del pabellón de ingeniería eléctrica	78
5.2. Paneles solares.....	79
5.3. Inversor del Sistema de Generación Distribuida	83
5.4. Sistema de Generación Distribuida con sistema discreto de seguimiento solar	90

CAPITULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIONES	147
6.1. Producción de energía diaria.....	147
CONCLUSIONES	152
SUGERENCIAS	154
BIBLIOGRAFÍA.....	155
ANEXOS	160
Hoja técnica de los módulos solares.....	160
Hoja técnica del inversor del sistema fotovoltaico.....	162
Script del cálculo de cantidad de energía diaria.....	164
Script de conexión del modelo PVArray	166

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica del comportamiento del rendimiento para la condición de día soleado	16
Figura 2 Sistema fotovoltaico fijo.....	27
Figura 3. Componentes de un sistema fotovoltaico	28
Figura 4. Sistema de seguimiento solar.....	28
Figura 5. Funcionamiento de un sistema discreto de seguimiento solar.....	29
Figura 6. Tipos de seguimiento solar	30
Figura 7. Componentes de un sistema fotovoltaico se seguimiento solar.....	32
Figura 8. Principales componentes de los sistemas fotovoltaicos	32
Figura 9. Modelo de bloques en Simulink	35
Figura 10. Tipos de paneles.....	37
Figura 11. Comportamiento de la eficiencia para la condición de día soleado.....	38
Figura 12 Curva de producción de dos sistemas fotovoltaicos	38
Figura 13. Tipos de radiación.....	39
Figura 14. Curva de irradiación.....	41
Figura 15. Tipos de irradiancia.....	43
Figura 16. Curva tensión-corriente en un módulo fotovoltaico	44
Figura 17. Curva de la potencia en un módulo fotovoltaico	45
Figura 18. Perfil de irradiancia del SGD.....	60
Figura 19. Modelo del sistema fotovoltaico de la UNSAAC.....	79
Figura 20. Sistema de Generación Distribuida de Ingeniería Eléctrica.....	80
Figura 21. Características técnicas del panel AS-6P.....	80
Figura 22. Corriente vs Voltaje del modelo PV en Matlab.....	81

Figura 23. Potencia vs Voltaje del modelo PV en Matlab	81
Figura 24. Irradiancia obtenida durante un periodo de tiempo	82
Figura 25. Curvas de tensión y corriente del puente inversor IGBT.....	84
Figura 26. Curva de tensión del inversor IGBT entre líneas.....	84
Figura 27. Modulación PWM SENOIDAL.....	86
Figura 28. Vista general de la modulación PWM SENOIDAL	87
Figura 29. Zona 1 de la modulación PWM SENOIDAL	88
Figura 30. Zona 2 de la modulación PWM SENOIDAL	88
Figura 31. Zona 3 de la modulación PWM SENOIDAL	89
Figura 32. Tensión entre fases	90
Figura 33. Sistema fotovoltaico con sistema discreto de seguimiento solar.....	91
Figura 34. Perfil de irradiancia del SGD con el sistema discreto de seguimiento solar	92
Figura 35. Comparación de perfiles de irradiancia de ambos sistemas.....	148
Figura 36. Método del trapecio para el perfil del sistema fijo	148
Figura 37. Método del trapecio para el perfil del sistema discreto con seguimiento solar	149

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Radiación Solar Promedio en Cusco.....	16
Tabla 2. Instalaciones Fotovoltaicas Fijas en el Departamento del Cusco.....	17
Tabla 3. Rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos.....	18
Tabla 4. Matriz de consistencia.....	56
Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables.....	57
Tabla 6. Perfil de irradiancia del SGD.....	61
Tabla 7. Valores usados para el calculo.....	62
Tabla 8. Resumen de cálculos para el sistema fijo.....	77
Tabla 9. Parámetros de los paneles solares del pabellón de ingeniería eléctrica.....	81
Tabla 10. Irradiancia del sistema fotovoltaico fijo.....	82
Tabla 11. Resumen de cálculos para el sistema fotovoltaico con seguimiento solar.....	144
Tabla 12. Resumen de los cálculos realizados para cada sistema.....	146
Tabla 13. Resumen de los cálculos de cada trapecio del perfil del sistema fijo.....	149
Tabla 14. Resumen de los cálculos de cada trapecio del perfil del sistema discreto con seguimiento solar.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS

FV: Fotovoltaico

UNSAAC: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

SGD: Sistema de Generación Distribuida

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature (Temperatura nominal de funcionamiento de la celda)

STC: Standard Test Conditions (Condiciones Estándar de Prueba)

DC: Corriente Continua

AC: Corriente Alterna

PWM: Modulación por Ancho de Pulso

SPWM: Modulación Senoidal por Ancho de Pulso

IGBT: Transistor Bipolar de Puerta Aislada

MATLAB: Matrix Laboratory

kW: Kilovatio

kWh: Kilovatio-hora

W/m²: Vatios por metro cuadrado

Wh/m²: Vatios-hora por metro cuadrado

V: Voltio

A: Amperio

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Radiación solar: Energía emitida por el sol en forma de radiación electromagnética.

Irradiancia solar: Potencia de la radiación solar incidente sobre una superficie en un instante determinado, expresada en W/m^2 .

Irradiación solar: Cantidad de energía solar acumulada sobre una superficie durante un intervalo de tiempo, expresada en Wh/m^2 o kWh/m^2 .

Sistema fotovoltaico: Conjunto de componentes que convierten la energía solar en energía eléctrica.

Sistema de seguimiento solar: Sistema que ajusta la orientación del panel para seguir la trayectoria del sol y maximizar la captación de energía.

Temperatura ambiente: Temperatura del aire que rodea al módulo fotovoltaico.

Temperatura del módulo fotovoltaico: Temperatura real de operación del panel, influenciada por la irradiancia y condiciones ambientales.

NOCT: Temperatura nominal de operación del módulo bajo condiciones estándar de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad de viento.

Eficiencia del módulo fotovoltaico: La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se refiere a la capacidad de un sistema para convertir la energía solar en energía eléctrica

Rendimiento energético: Relación entre la energía generada por el sistema y el recurso solar disponible.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

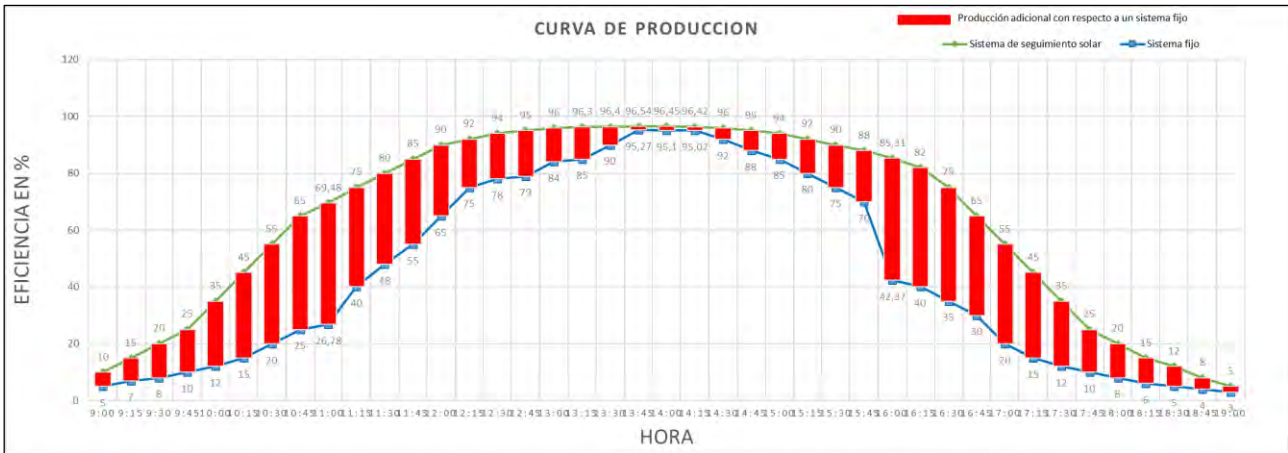
1.1. Planteamiento del problema

La energía solar se ha consolidado como una de las principales fuentes renovables para la generación de electricidad debido a su bajo impacto ambiental y la abundancia de su recurso en diversas regiones del mundo. En el contexto peruano, y específicamente en el Departamento del Cusco, la irradiación solar varía considerablemente a lo largo del año, lo que abre una gran oportunidad para aprovechar este recurso natural. Según el X Simposio Peruano de Energía Solar, la irradiación promedio diaria en Cusco oscila entre 5.0 kWh/m²/día y 6.0 kWh/m²/día, lo que demuestra el gran potencial de la región para la generación de energía fotovoltaica (Zanabria, 2012)

A pesar de este alto potencial, muchos de los sistemas fotovoltaicos instalados en el Cusco, incluidos los de la UNSAAC, aún están basados en paneles solares fijos. Estos paneles tienen un rendimiento limitado, ya que no ajustan su orientación para seguir el movimiento del sol, lo que impide una captación óptima de la radiación solar. En un análisis realizado por la Gerencia de Regulación de Tarifas - División de Distribución Eléctrica (2021), se encontró que, en zonas rurales del Cusco, los paneles solares fijos, aunque útiles, producen menos energía eléctrica en comparación con los sistemas fotovoltaicos que incorporan un seguimiento solar. Esto se debe a que, a lo largo del día, el sol cambia su posición, y sin un sistema de seguimiento, la radiación incide en los paneles en un ángulo subóptimo, reduciendo la generación de electricidad.

En un estudio realizado por Pelayo Lopez en 2020 se diseñó e implementó un seguidor solar de un eje con un sistema de control teniendo como objetivo de mejorar el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos, haciendo una comparativa del sistema diseñado con la de un sistema fotovoltaico fijo. Teniendo los siguientes datos

Figura 1. Gráfica del comportamiento del rendimiento para la condición de día soleado



Fuente: (Adaptado de Lopez, Sedano de la Rosa, Rojano,2020)

En el trabajo presentado se describe que el porcentaje promedio del rendimiento del sistema de seguimiento solar fue mayor que el sistema fijo. Al extraer más energía del panel fotovoltaico con seguimiento solar durante un tiempo mayor, promueve que el sistema propuesto sea más rentable comparado con la energía que se logra con paneles solares fijos.

La deficiencia en la captación de energía se agrava cuando las estaciones cambian, ya que los paneles solares fijos no pueden adaptarse a la variabilidad de la radiación solar en diferentes épocas del año.

En el departamento del Cusco, la irradiación solar en invierno, por ejemplo, se reduce a 4.5 kWh/m²/día, mientras que en verano puede alcanzar hasta 6.0 kWh/m²/día (Zanabria, 2012). Esto crea una disparidad en el rendimiento de los paneles solares, afectando la producción de energía y, por ende, la sostenibilidad del sistema.

Tabla 1. Radiación Solar Promedio en Cusco

Mes	Irradiación Promedio (kWh/m ² /día)
Enero	5.2
Febrero	5.3
Marzo	5.5
Abril	5.0

Mayo	5.1
Junio	4.8
Julio	5.0
Agosto	5.2
Septiembre	5.4
Octubre	5.6
Noviembre	5.5
Diciembre	5.3

(X Simposio Peruano de Energía Solar, 2012)

Este problema es particularmente relevante en la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC, donde se han instalado un sistema de paneles solares fijos en el campus. Aunque estos sistemas contribuyen al uso de energía limpia.

Tabla 2. Instalaciones Fotovoltaicas Fijas en el Departamento del Cusco

Provincia	Instalaciones Fotovoltaicas Fijas	Potencia instalada (kW)
Acomayo	66	15.75
Anta	302	78.24
Calca	927	241.02
Canas	619	160.95
Cusco	5	1.30
La Convención	528	136.44
Paucartambo	965	250.95
Quispicanchi	700	182

(Gerencia de Regulación de Tarifas - División de Distribución Eléctrica, 2021)

La solución a esta problemática podría ser la implementación de un sistema de seguimiento solar, el cual ajusta los paneles para mantenerlos alineados a la luz solar a lo largo del día. La incorporación de un sistema de seguimiento, que puede ser de un eje o dos ejes, ha demostrado en diversos estudios que incrementa la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos entre 30% y 40% en comparación con los paneles fijos (Franco, 2015)

Este tipo de tecnología no solo optimiza la captación de energía solar, sino que también mejora la autonomía energética en zonas remotas o fuera de la red eléctrica, como es el caso de las áreas rurales del Cusco, donde los sistemas fijos no logran satisfacer completamente la demanda.

Por lo tanto, el presente estudio se propone investigar la viabilidad de mejorar del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos instalados en la UNSAAC mediante el uso de un modelo de seguimiento solar discreto implementado en MATLAB.

Tabla 3. Rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos

Sistema	Rendimiento (%)
Sistema fotovoltaico fijo	-
Sistema de seguimiento solar (1 eje)	90% (incremento del 30%)
Sistema de seguimiento solar (2 ejes)	95% (incremento del 40%)

(Adaptado de Franco y Turpo (2015), Layme (2017).)

1.1.1. Problema Principal

¿En qué medida varía el rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC al implementar un modelo de sistema discreto de seguimiento solar?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC como base para la comparación con el modelo de sistema discreto de seguimiento solar?
- ¿Cuál es el impacto de la implementación de un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la mejora del rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC?

- ¿Qué diferencia existe entre un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la producción de energía con respecto a los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC?

1.2. Justificación

La Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) se encuentra en una región con un alto potencial para la generación de energía solar, gracias a su ubicación geográfica privilegiada, es en ese sentido que aprovechar este recurso renovable no solo contribuye a los objetivos de sostenibilidad de la institución, sino que también ayuda a reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales y no renovables.

- **Justificación Técnica:** Este proyecto, centrado en la implementación de sistemas discretos de seguimiento solar, tiene un impacto directo en la optimización de la captación de energía, lo cual mejorará sustancialmente del rendimiento de los paneles fotovoltaicos disponibles.

Mediante el uso de tecnología de seguimiento solar, los paneles fotovoltaicos se orientan de manera dinámica y precisa hacia la radiación solar, lo que resulta en un aprovechamiento más efectivo de la energía disponible.

- **Justificación Académica:** Este proyecto ofrece una valiosa oportunidad educativa para los estudiantes, quienes podrán involucrarse en la práctica y la investigación en energías renovables.

Este enfoque no solo enriquece su formación académica y profesional, sino que también contribuye al desarrollo de competencias en áreas de alta demanda, como la ingeniería sostenible y la tecnología de energías limpias.

- **Justificación Social:** La mejora en la producción energética no solo tiene un impacto ambiental positivo, sino que también ofrece un beneficio económico significativo.

Este proyecto puede posicionar a la UNSAAC como un referente en el desarrollo de métodos de optimización que puedan ser aplicados tanto dentro de la institución como fuera de ella, favoreciendo la generación de conocimiento que beneficie a la comunidad educativa y científica.

- **Justificación Económica:** La mejora en la producción energética no solo tiene un impacto ambiental positivo, sino que también ofrece un beneficio económico significativo. Al optimizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, la UNSAAC podría reducir sus costos operativos asociados al consumo de electricidad.

En el contexto actual, donde las tarifas eléctricas representan un gasto considerable para las instituciones educativas, esta optimización resulta aún más relevante.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la variación del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC al implementar un modelo de sistema discreto de seguimiento solar.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC como base para la comparación con los sistemas discretos de seguimiento solar.
- Analizar el impacto de la implementación de un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la mejora del rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC.

- Analizar la diferencia que existe entre un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la producción de energía con respecto a los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC.

1.4. Alcance

El alcance de este estudio se centrará en la modelación y simulación de un sistema discreto de seguimiento solar adaptado a los sistemas fotovoltaicos instalados en la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC. La investigación incluirá un análisis completo de la viabilidad técnica, y evaluar cómo su implementación podría optimizar la producción de energía en comparación con el sistema fotovoltaico fijo actualmente instalado.

El modelo de seguimiento solar discreto será desarrollado utilizando MATLAB y se basará en los datos proporcionados por el sistema fotovoltaico existente en el campus, tales como producción energética, radiación solar y temperatura ambiente. Estos datos se recolectarán directamente del sistema fotovoltaico de la UNSAAC o serán proporcionados a partir de informes técnicos del sistema instalado, asegurando que la simulación sea representativa de las condiciones reales de la instalación.

El análisis se enfocará en la simulación computacional del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar. Se consideró un modelo de seguimiento, para evaluar cómo esta tecnología mejora el rendimiento energético en comparación con los sistemas fotovoltaicos fijos actualmente operativos en la UNSAAC.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes.

2.1.1. Antecedentes internacionales

1. **Gonzalez, M., & Kessler, M. (2019)** . “Performance Analysis of an Optimized Solar Tracking System.” *Renewable Energy* , 140, 860-868.
 - Este estudio analiza la efectividad de diferentes sistemas de seguimiento solar y propone un modelo optimizado que mejora la producción energética en comparación con sistemas fijos. Se basa en simulaciones y mediciones en campo.
2. **Ramiro, A., & Tovar, G. (2020)** . “The Impact of Solar Tracking Systems on Photovoltaic Energy Production: A Review.” *Solar Energy* , 197, 100-112.
 - Este artículo examina diversos estudios de caso sobre la implementación de sistemas de seguimiento solar en diferentes contextos, analizando su impacto en la eficiencia energética. Además, proporciona directrices clave para los futuros desarrollos en este ámbito.
3. **García, R., & López, D. (2021)** . “Smart Solar Tracking Systems: Design, Development, and Implementation.” *Energy Reports* , 7, 345-355.
 - En esta investigación, los autores presentan un enfoque integral para el diseño de sistemas de seguimiento solar inteligentes que implementan algoritmos de control avanzados. Los resultados demuestran aumentos significativos en la captación de energía solar.

4. **Chen, Y., & Zhang, J. (2022)** . “Dynamic Modeling and Simulation of Solar Tracking Systems for Enhanced Performance.” *Journal of Solar Energy Engineering* , 144(5), 051006.

- Este estudio propone un modelo dinámico para simular el comportamiento de sistemas de seguimiento solar, proporcionando datos que muestran un aumento del 30% en la producción energética en condiciones óptimas.

5. **Tsiavos, P., & Karakoulidis, T. (2020)** . “Comparative Study of Fixed vs. Tracking PV Systems: The Role of Technology and Location.” *International Journal of Renewable Energy Research* , 10(2), 435-448.

- Este artículo compara sistemas fotovoltaicos fijos y de seguimiento en diversas localizaciones geográficas, analizando cómo la tecnología seleccionada y las condiciones ambientales afectan la producción de energía.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

1. **Montenegro, J. (2019)** . "Potencial de la energía solar fotovoltaica en el Perú: Análisis y perspectivas". *Revista de Energías Renovables del Perú* , 8(2), 45-62.

- Este estudio analiza el potencial solar del Perú, resaltando las áreas con mayor irradiación, y propone estrategias para la implementación de sistemas fotovoltaicos en diversas regiones del país. El autor enfatiza la necesidad de mejorar la infraestructura y política energética para aprovechar este recurso.

2. **Rivas, C. & Gómez, F. (2021)** . "Evaluación técnica y económica de sistemas de energía solar en instituciones educativas: Caso de estudio en universidades peruanas". *Ingeniería Energética* , 15(1), 30-48.

- Esta investigación evalúa diferentes modelos de implementación de energía solar en universidades, realizando un análisis Costo-Beneficio para determinar su viabilidad en el contexto nacional. Los autores plantean recomendaciones para la adopción de tecnología solar en el ámbito educativo.
3. **Carrillo, L. (2020)** . "Optimización de sistemas fotovoltaicos mediante tecnologías de seguimiento solar: Aplicación en zonas rurales del Perú". *Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería* .
- Esta tesis investiga el uso de sistemas de seguimiento solar en comunidades rurales, demostrando que la implementación de tecnología eficiente puede aumentar significativamente la producción de energía. Se presentan datos sobre la mejora en la eficiencia generada en comparación con sistemas fijos.
4. **Pérez, M. & Silva, R. (2022)** . "Energías renovables en el Perú: Políticas, desafíos y oportunidades". *Revista peruana de Energía y Cambio Climático* , 3(1), 18-37.
- En este artículo se discuten las políticas energéticas del Perú en relación con el uso de energías renovables, con énfasis en los retos y oportunidades para el desarrollo de proyectos solares. Los autores sugieren que la mejora de políticas puede fomentar la inversión en tecnologías limpias.
5. **Castillo, A. (2018)** . "Impacto de la energía solar en la reducción de la huella de carbono en instituciones educativas: Un análisis en el contexto peruano". *Tesis de pregrado, Universidad de San Marcos* .
- Esta investigación aborda el impacto ambiental de la implementación de sistemas solares en instituciones educativas, destacando cómo estas iniciativas contribuyen a la reducción de la huella de carbono. El autor argumenta que la adopción de

energía solar no solo es beneficiosa económicamente, sino también ambientalmente.

2.2. Fundamentos Teóricos

2.2.1. Energía Solar fotovoltaica

En la actualidad, la generación de energía eólica supera considerablemente a la solar fotovoltaica, aunque su aprovechamiento está limitado a áreas específicas. Por otro lado, la energía solar tiene el potencial de ser utilizada en la mayoría de las regiones del mundo. Este tipo de energía transforma la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Hoy en día, esta tecnología se basa en el uso de semiconductores que producen energía eléctrica cuando se exponen a la luz solar (GRUPO NAP, 2012).

Esta conversión ocurre en un conjunto de varios elementos, las celdas eléctricas son los encargados de recepcionar la radiación del sol y generar la energía eléctrica. Los demás elementos en conjunto dan forma a lo que conocemos Sistema Fotovoltaico.

Dentro de la clasificación de un sistema fotovoltaico se puede considerar generalmente dos grupos: sistemas conectados a la red y sistemas aislados.

Los sistemas conectados a la red permiten una sincronización con la red a la que se conecta puesto que la energía producida por este sistema se consumirá y lo que exceda se inyectará a la red gracias al elemento importante, los inversores.

En los sistemas aislados, además de los inversores, se incorporan reguladores y baterías; estos elementos permiten la conversión de corriente continua en corriente alterna para su distribución hacia la carga.

2.2.2. Sistemas fotovoltaicos fijos

Un sistema fotovoltaico fijo es aquel en el que los módulos solares se instalan con una orientación e inclinación determinada, generalmente optimizada para captar la máxima radiación solar en promedio durante el año. Esta orientación suele fijarse hacia el norte en el hemisferio sur y hacia el sur en el hemisferio norte, con un ángulo igual a la latitud del lugar o ajustado ligeramente para maximizar la captación anual (Muñoz & Barahona, 2020).

Los sistemas fijos son ampliamente utilizados debido a su simplicidad estructural, menores costos de inversión y operación, así como su facilidad de mantenimiento. No obstante, su capacidad de captación de energía se ve limitada por la trayectoria aparente del sol a lo largo del día, ya que los paneles solo reciben radiación directa de forma óptima durante ciertas horas.

Una de las principales desventajas de esta configuración es que la eficiencia energética del sistema disminuye en las horas del día en las que el sol no incide de forma perpendicular sobre los módulos. Según Delgado y Martínez (2022), los sistemas fijos pueden aprovechar entre un 70 % y un 80 % de la energía solar disponible en condiciones óptimas, pero esta cifra puede ser menor en zonas con alta nubosidad o en periodos de invierno.

A pesar de estas limitaciones, siguen siendo la opción preferida en instalaciones residenciales o rurales, donde la relación costo-beneficio, simplicidad técnica y durabilidad son factores determinantes.

Figura 2 Sistema fotovoltaico fijo.



Fuente: (FHsolar&ledIberica, 2020)

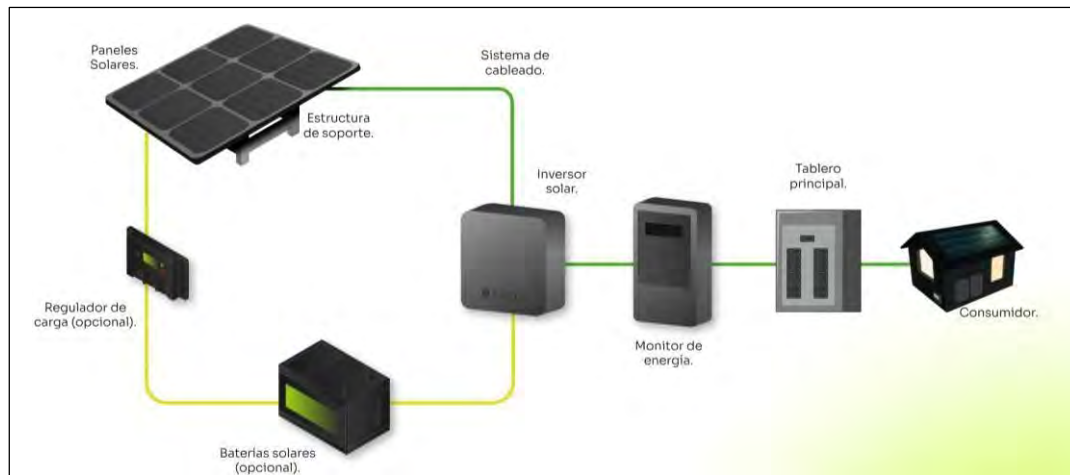
2.2.3. Componentes de un sistema fotovoltaico fijo

Los sistemas fotovoltaicos fijos están compuestos por varios elementos que permiten su correcto funcionamiento. Los principales componentes: son los módulos solares celdas fotovoltaicas, generalmente de silicio monocristalino, policristalino.

Otro componente fundamental es la estructura de soporte, que mantiene los módulos en su lugar, permitiendo una inclinación fija diseñada para optimizar la captación solar durante el año (García et al., 2021).

Además, se incluyen los inversores, que convierten la electricidad de corriente continua producida por los paneles en corriente alterna (AC), apta para el consumo o la inyección a la red eléctrica. También es fundamental el sistema de protección eléctrica, que incluye interruptores, fusibles, descargadores de sobretensión, y, en algunos casos, sistemas de monitoreo que permiten el control del rendimiento del sistema. En instalaciones autónomas o aisladas, se incorporan bancos de baterías y controladores de carga, que permiten almacenar energía para su uso posterior.

Figura 3. Componentes de un sistema fotovoltaico

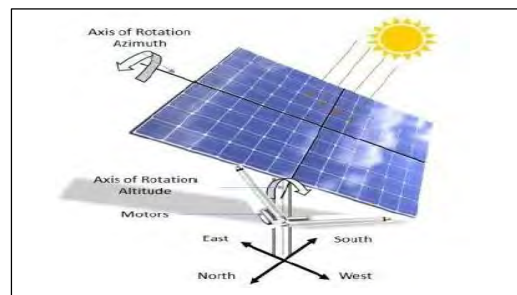


Fuente: (ERCO, 2024)

2.2.4. Sistemas de seguimiento solar

A diferencia de los sistemas fotovoltaicos fijos, los sistemas de seguimiento solar tienen la función de orientar los módulos de manera continua hacia la posición del sol, lo que favorece la producción de energía eléctrica; dentro de este tipo de sistemas, se encuentran las categorías de un eje, dos ejes y los híbridos

Figura 4. Sistema de seguimiento solar



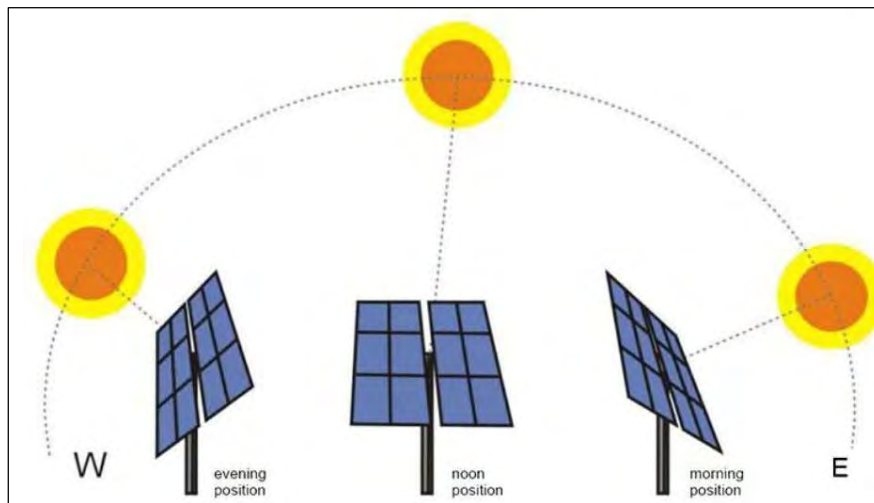
Fuente: (SIGMAEARTH, 2024)

2.2.5. Sistemas de seguimiento discreto

Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar discreto consisten en mecanismos que ajustan la orientación de los módulos solares en varios intervalos definidos durante el día. A diferencia del seguimiento continuo, el discreto realiza movimientos angulares en pasos, permitiendo a los paneles "seguir" al sol a través del cielo con menos complejidad mecánica y menor consumo energético.

El objetivo del seguimiento solar discreto es aumentar la captación de radiación directa durante más horas del día, optimizando la producción energética sin los altos costos de sistemas con seguimiento continuo. (López-Vargas, 2020) destacan que, mediante el seguimiento discreto, se puede aumentar la generación de energía entre un 15 % y un 35 % respecto a un sistema fijo, dependiendo de la localización geográfica y las condiciones climáticas.

Figura 5. Funcionamiento de un sistema discreto de seguimiento solar



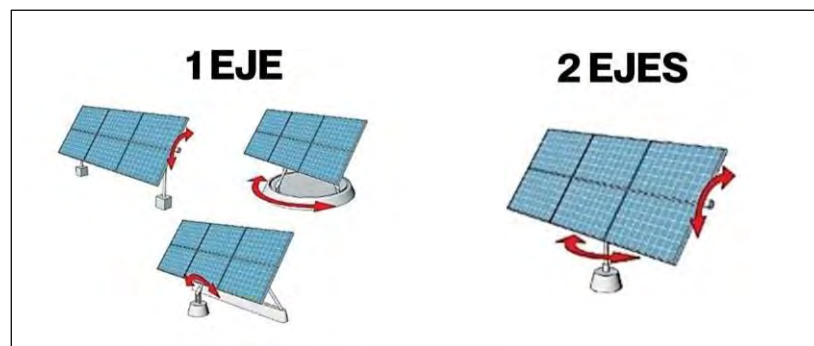
Fuente: (LBAINDUSTRIAL, 2018)

2.2.6. Tipos de seguimiento discreto

Los sistemas con seguimiento solar discreto pueden clasificarse, según la cantidad de ejes de movimiento, en seguimiento de un eje y seguimiento de dos ejes. El seguimiento de un eje permite la rotación de los módulos en un único eje, que puede ser horizontal (eje este-oeste) o vertical (eje norte-sur). Esta configuración es común en plantas solares de mediana escala, y mejora la captación solar principalmente durante la mañana y la tarde, cuando la inclinación del sol respecto al panel es mayor (Hernández, 2022)

El seguimiento de dos ejes, por su parte, ajusta tanto el ángulo de azimut como la elevación del panel, permitiendo un seguimiento más preciso del sol durante todo el día y en todas las estaciones. Esta configuración es más compleja y costosa, pero puede incrementar la eficiencia energética hasta en un 40 %, según el tipo de instalación. Aunque el seguimiento de dos ejes discreto no alcanza la precisión del seguimiento continuo, ofrece una excelente relación entre eficiencia, consumo energético del sistema y simplicidad de diseño (Solano, 2021)

Figura 6. Tipos de seguimiento solar



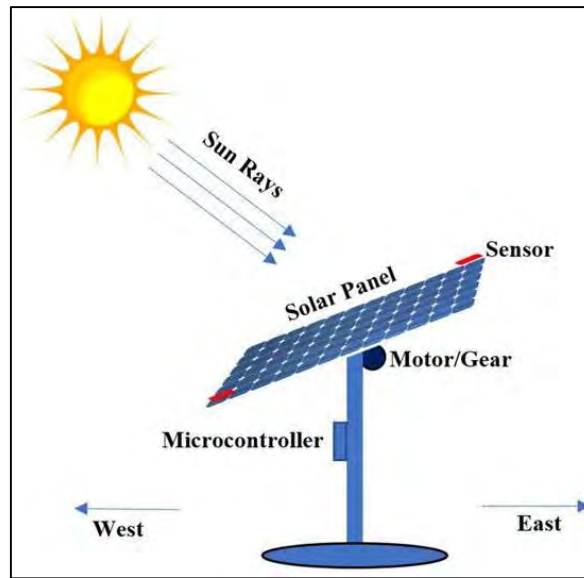
Fuente: (GREENKw, 202024)

2.2.7. Componentes principales de un sistema de seguimiento solar

Los sistemas de seguimiento solar discreto requieren componentes adicionales respecto a los sistemas fijos. El primero es el actuador o motor, que proporciona el movimiento físico al sistema. Puede ser un motor eléctrico paso a paso, hidráulico o mecánico, dependiendo del tipo de diseño. Junto a este, se encuentra el controlador de seguimiento, que ejecuta un programa preestablecido con base en datos astronómicos (coordenadas geográficas, fecha y hora) para calcular la posición óptima del sol. Este tipo de control no requiere sensores solares, aunque pueden utilizarse para corregir errores de posición (Rodríguez-Gallegos, 2018)

Otros componentes relevantes incluyen una estructura móvil robusta, diseñada para soportar los módulos y resistir cargas por viento y movimiento mecánico frecuente. También se incorporan sistemas de seguridad y freno, que protegen al sistema en caso de vientos fuertes o fallos de energía. El resto de los componentes (módulos, inversores, sistemas de protección) son similares a los de un sistema fijo. No obstante, es fundamental que el diseño estructural y eléctrico considere las tensiones mecánicas adicionales derivadas del movimiento periódico de los paneles (López-Vargas, 2020)

Figura 7. Componentes de un sistema fotovoltaico de seguimiento solar



Fuente: (MDPI, 2023)

En el siguiente cuadro se muestra un cuadro con los principales componentes de un sistema solar fijo con un sistema de seguimiento solar.

Figura 8. Principales componentes de los sistemas fotovoltaicos

Componentes	Sistema Fotovoltaico Fijo	Sistema de Fotovoltaico de Seguimiento Solar
Paneles fotovoltaicos (módulos)	Utilizan módulos fijos, generalmente dispuestos en una inclinación fija estratégicamente según el lugar.	Utilizan los mismos módulos fotovoltaicos, pero están montados en estructuras móviles que permiten seguir la trayectoria del sol.
Estructura de soporte	Son estructuras fijas que mantiene a los paneles en una posición estática. Suelen ser de aluminio o acero inoxidable.	Estructura móvil, que permite el movimiento de los paneles para seguir al sol, generalmente equipada con actuadores y motores.
Motor y actuadores	No se requiere motor, ya que la estructura es fija.	Incluye motores y actuadores para mover los paneles en función de la posición del sol (puede

		ser de un solo eje o doble eje).
Sistema de control	No requiere sistema de control. El ángulo de inclinación se ajusta al instalar el sistema.	Necesita un sistema de control para ajustar los paneles cada cierto tiempo.
Inversor	Convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles en corriente alterna (CA), igual que en el sistema de seguimiento.	
Baterías	Usadas en sistemas aislados para almacenar energía, pero no son necesarias en sistemas conectados a la red.	Igual que en los sistemas fijos, pero en sistemas autónomos también se puede incluir almacenamiento de energía.

Fuente: (Elaboración propia)

2.2.8. Modelo matemático de sistemas de seguimiento solar

El comportamiento de un sistema de seguimiento solar se puede representar mediante ecuaciones diferenciales que describen la relación entre la entrada (posición deseada del sol) y la salida (posición alcanzada por el panel).

La potencia eléctrica generada por un módulo fotovoltaico puede expresarse como el producto de la irradiancia incidente, el área del panel y su eficiencia, tal como se describe en el libro especializado en sistemas fotovoltaicos (Messenger, 2010; Duffie & Beckman, 2013).

$$P_G = G \cdot A \cdot n$$

Donde:

P_G : Potencia generada en [W]

G : Irradiancia solar [W/m^2]

A : Área del panel [m^2]

n : Eficiencia del modulo

Para un panel con seguimiento, el valor de G es mayor debido a que el ángulo de incidencia siempre busca ser o cercano a ser perpendicular.

2.2.9. Matlab

MATLAB es un entorno de programación que permite trabajar con cálculos numéricos, análisis de datos y simulación. Su capacidad de resolver sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas le permite modelar fenómenos físicos y procesos energéticos.

Según Attia (2022), MATLAB es ampliamente utilizado en investigación en ingeniería eléctrica porque permite combinar modelado matemático, visualización y análisis de resultados en un solo entorno.

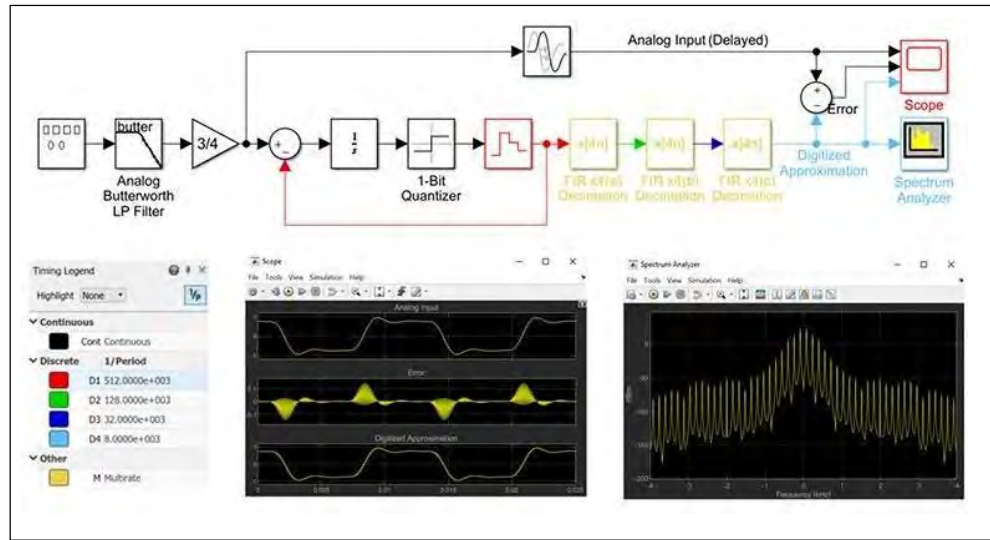
2.2.10. Simulink

MATLAB ofrece una extensión llamada **Simulink** el cual permite manejar diagramas de bloques para modelar sistemas dinámicos. Dentro de Simulink, la librería **Simscape Electrical** (anteriormente SimPowerSystems) incluye bloques específicos para energías renovables, como:

- **PV Array**: modelo detallado de panel fotovoltaico.
- **Inversores, convertidores DC/DC y DC/AC.**
- Herramientas para **análisis de potencia y control.**

Estas herramientas permiten construir modelos que representan el comportamiento eléctrico de un sistema fotovoltaico y estudiar su desempeño bajo distintas condiciones ambientales (MathWorks., s.f.)

Figura 9. Modelo de bloques en Simulink



Fuente: (MathWoks,2025)

2.3. Efecto fotovoltaico

Es un fenómeno físico que ocurre cuando los fotones de la luz solar excitan los electrones de un material semiconductor, generando una corriente eléctrica. Este fenómeno se produce en las celdas fotovoltaicas, que están compuestas principalmente de silicio, el cual es un material semiconductor.

El proceso básico implica que cuando la luz incide sobre la celda, los fotones son absorbidos y liberan electrones, los cuales son recolectados por un campo eléctrico interno, generando de esta manera una corriente eléctrica.

El modelo matemático para describir el comportamiento de una celda fotovoltaica es:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$$

Donde:

I : Corriente generada por la celda

V : Voltaje de la celda fotovoltaica.

q : Carga del electrón.

n : Factor de idealidad.

k : Constante de Boltzman.

T : Temperatura en Kelvin (Green, 2008).

Este modelo permite predecir cómo se comporta la celda en función de las condiciones de luz y temperatura, lo cual es crucial para el diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos.

2.4. Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se refiere a la capacidad de un sistema para convertir la energía solar en energía eléctrica de manera efectiva.

Es un indicador crucial para determinar el rendimiento de un sistema fotovoltaico, ya que influye directamente en la cantidad de energía generada en función de la irradiación solar.

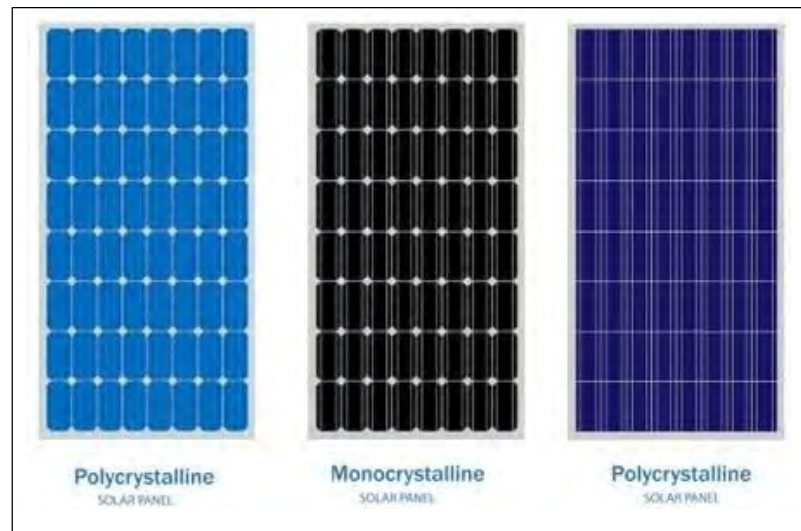
En resumen, la eficiencia mide el porcentaje de energía solar que un panel fotovoltaico puede convertir en electricidad útil.

La eficiencia de los paneles solares varía dependiendo del tipo de tecnología utilizada en su fabricación. A continuación, se presentan los rangos de eficiencia típicos para los tipos más comunes de paneles solares:

- **Paneles Monocristalinos:** Estos paneles tienen la mayor eficiencia, que puede superar el 20% en condiciones ideales de radiación solar (Green, 2008)

- **Paneles Policristalinos:** Su eficiencia es algo menor, generalmente entre el 15% y el 18%, debido a las imperfecciones en su estructura cristalina (Markvart, 2003)
- **Paneles de Película Delgada:** Los paneles de película delgada son más baratos de fabricar, pero su eficiencia es inferior, rondando entre el 10% y el 12% (Hegedus, 2003)
- **Paneles de Celdas de Perovskita:** Estos son una tecnología emergente con rendimientos prometedores que superan el 30% en algunas configuraciones, aunque todavía están en etapas de investigación y desarrollo (Green, 2008)

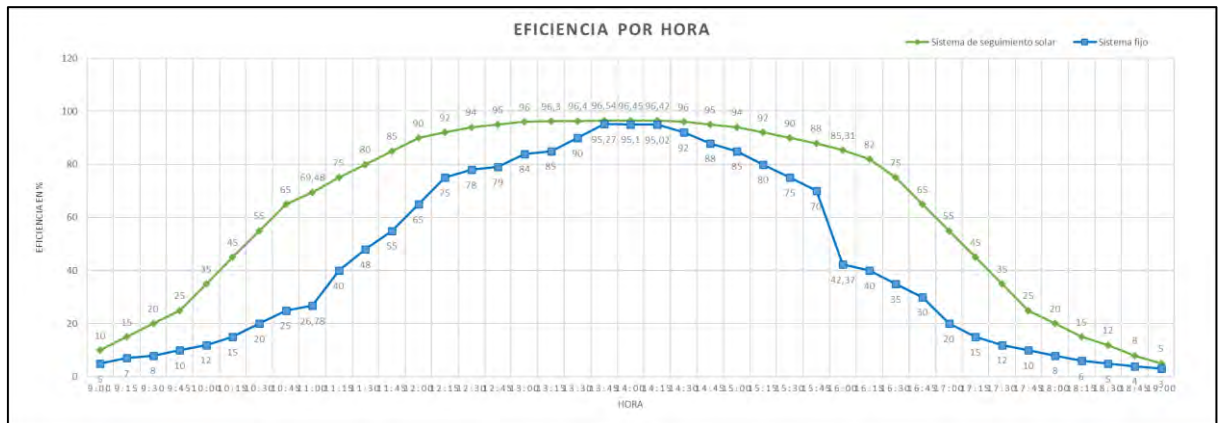
Figura 10. Tipos de paneles



Fuente: (EDP. Muñoz, 2023)

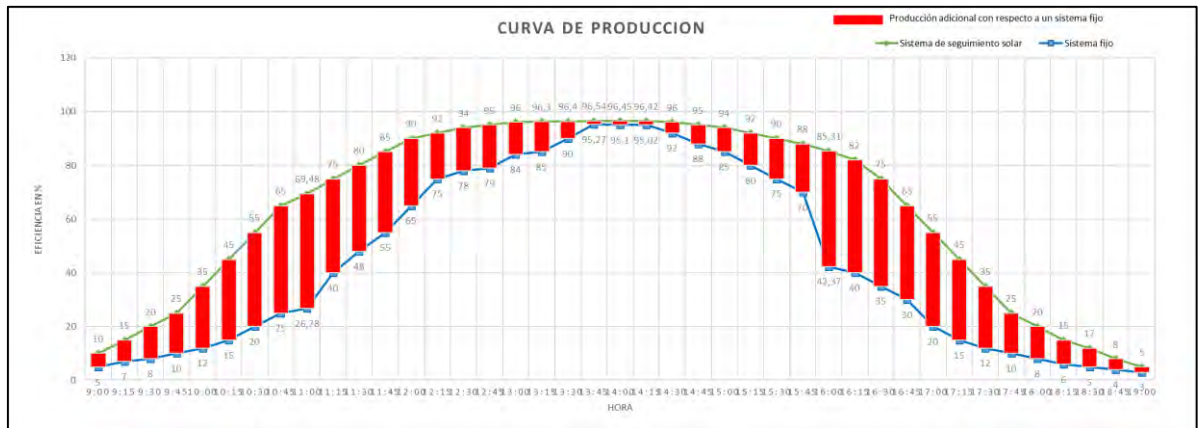
La curva característica de eficiencia de un panel fotovoltaico puede expresarse con respecto a la hora y en base a la potencia o a la eficiencia, en un día nublado o soleado la curva tenderá a formar una campana para un sistema fijo y en cuanto a uno de seguimiento solar será un poco más plana.

Figura 11. Comportamiento de la eficiencia para la condición de día soleado



Fuente: (Adaptado de Lopez, Sedano de la Rosa, Rojano,2020)

Figura 12 Curva de producción de dos sistemas fotovoltaicos



Fuente: (Adaptado de Lopez, Sedano de la Rosa, Rojano,2020)

2.5. Radiación solar

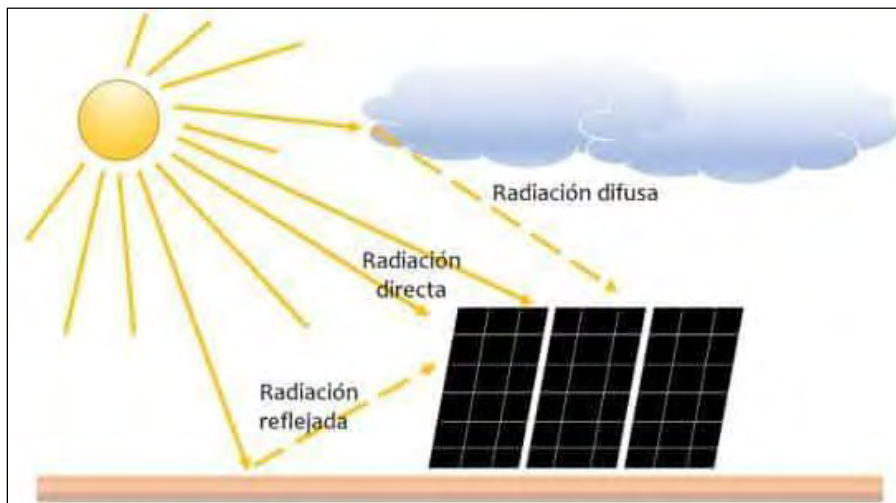
La radiación solar es la energía que el sol emite de manera continua en forma de radiación electromagnética, la cual abarca un amplio espectro que incluye luz visible, infrarroja, ultravioleta y otras longitudes de onda. La radiación solar es responsable de varios procesos naturales en la Tierra, incluido el calentamiento de la atmósfera y la generación de energía en los paneles fotovoltaicos. Según Pérez (1990), la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre se expresa

en vatios por metro cuadrado (W/m^2) y varía a lo largo del día y del año debido a la órbita terrestre y la inclinación del eje terrestre

La radiación solar que llega a la superficie terrestre se clasifica principalmente en tres tipos:

- Radiación directa: Es la radiación solar que llega directamente del sol, sin desviarse por la atmósfera. Esta es la radiación más eficiente para la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos.
- Radiación difusa: Es la radiación que ha sido dispersada por las partículas y gases de la atmósfera. Aunque es menos eficiente que la radiación directa, también contribuye a la generación de electricidad.
- Radiación reflejada: Es la radiación que ha sido reflejada por superficies terrestres como el suelo o cuerpos de agua. Esta radiación puede ser aprovechada en algunos sistemas fotovoltaicos mediante paneles de seguimiento (Hegedus, 2003).

Figura 13. Tipos de radiación



Fuente: (SUNFIELDS, 2024)

2.6. Irradiancia Solar

La irradiancia solar $G(t)$ representa la potencia instantánea de radiación solar incidente por unidad de área, expresada en W/m^2 . Esta magnitud es una función del tiempo y depende de factores astronómicos, geométricos y atmosféricos.

2.7. Irradiación solar

La irradiación solar es la cantidad total de energía radiante que incide sobre una superficie específica durante un periodo de tiempo determinado. Se mide en kilovatios hora por metro cuadrado (kWh/m^2) o julios por metro cuadrado (J/m^2). Esta medida es crucial para determinar la cantidad de energía que un sistema fotovoltaico puede generar.

Según (Markvart, 2003) la irradiación solar no es constante y depende de varios factores, como la ubicación geográfica, la inclinación de la superficie, las condiciones atmosféricas y la estación del año.

Matemáticamente, se define como la integral temporal de la irradiancia:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt$$

En modelos discretos, como el desarrollado en este estudio, la irradiación se aproxima mediante una suma:

$$H \approx \sum_{i=1}^N G_i \times \Delta t$$

Donde:

G_i : es la irradiancia en el intervalo i

Δt : es el paso temporal en horas

Esta formulación permite cuantificar el recurso solar disponible, pero no representa directamente la energía eléctrica generada.

Figura 14. Curva de irradiación



Fuente: (BLOGSudima, 2025)

podemos identificar la irradiación solar como el área inferior que crea la curva de la irradiancia con él se determina qué cantidad de vatios “W” incide en un metro cuadrado siendo su unidad W/m^2 .

2.7.1. Irradiancia global

La irradiancia global se refiere a la cantidad total de radiación solar que llega a una superficie. Es la suma de las irradiancias directa y difusa. La irradiancia global se mide típicamente en superficies horizontales, pero también se puede calcular para superficies inclinadas según la ubicación y la orientación de la instalación fotovoltaica. Esta medida es crucial para la evaluación

general de la energía solar disponible en un área específica, y es utilizada frecuentemente en estudios de viabilidad para la instalación de sistemas fotovoltaicos (López A. P., 2021)

2.7.2. Irradiancia directa

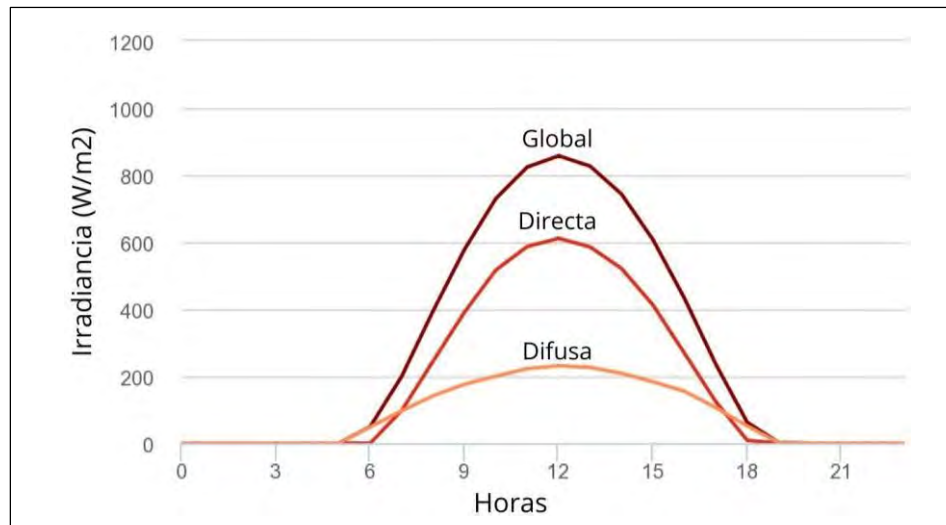
La irradiancia directa es la radiación solar que llega de manera directa desde el sol, sin sufrir ninguna dispersión en la atmósfera. Esta radiación es más intensa cuando el sol está alto en el cielo, en un día despejado sin obstrucciones como nubes o contaminación. La irradiancia directa es fundamental para los sistemas fotovoltaicos que siguen al sol, como los sistemas de seguimiento solar, ya que estos pueden maximizar la captura de esta componente de la radiación (Martínez, 2022)

2.7.3. Irradiancia difusa

La irradiancia difusa es la radiación solar que ha sido dispersada por las partículas en la atmósfera, como nubes, polvo, vapor de agua o aerosoles. A diferencia de la irradiancia directa, la irradiancia difusa llega a la superficie desde todas las direcciones del cielo. En condiciones de cielo nublado o parcialmente nublado, la irradiancia difusa se vuelve más significativa. Los sistemas fotovoltaicos fijos son particularmente sensibles a la irradiancia difusa, ya que no tienen la capacidad de seguir al sol y, por lo tanto, dependen más de esta componente cuando las condiciones climáticas no son ideales para captar radiación directa (Camarena, 2021)

El tipo de irradiancia predominante tiene un impacto directo en el diseño y la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Los sistemas fijos aprovechan principalmente la irradiancia global, con una mayor dependencia de la irradiancia difusa en días nublados. Por otro lado, los sistemas de seguimiento solar están optimizados para captar la irradiancia directa, lo que les permite mejorar significativamente su rendimiento en días despejados (García L. &, 2020)

Figura 15. Tipos de irradiancia

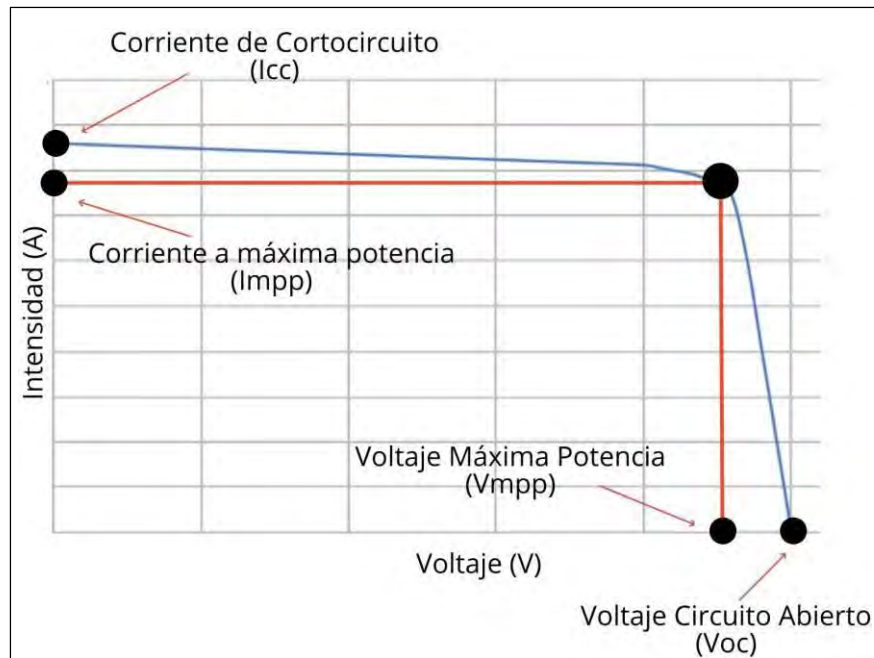


Fuente: (SUNFIELDS, 2025)

2.8. Curva tensión -corriente

La relación entre corriente y tensión en un panel solar varía según la cantidad de luz solar que recibe. Esta relación se representa mediante la curva I-V (corriente-tensión). La curva muestra cómo la corriente generada por el panel disminuye a medida que la tensión aumenta, hasta alcanzar el punto de máxima potencia (P_{max}) que es crítico para determinar la eficiencia del sistema. En condiciones de alta radiación solar, el panel opera cerca de su punto de máxima potencia, mientras que en condiciones de baja radiación, la corriente y la potencia generada disminuyen considerablemente (Aguilera, 2019)

Figura 16. Curva tensión-corriente en un módulo fotovoltaico

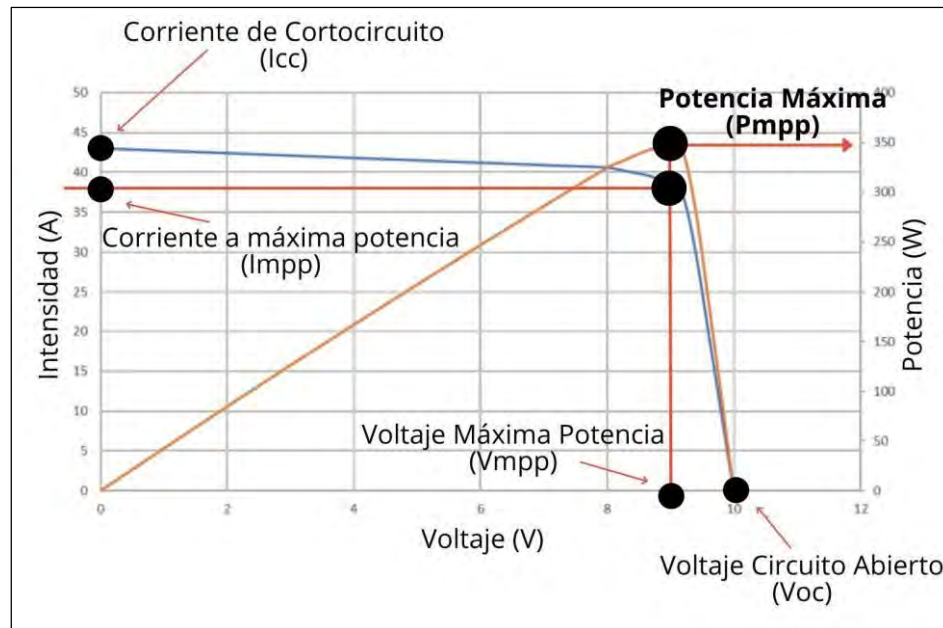


Fuente: (SUNFIELDS,2025)

2.9. Curva de potencia

La curva de potencia describe cómo la potencia generada por un panel fotovoltaico cambia en función de la tensión aplicada. El punto de máxima potencia (P_{max}) es donde la curva de potencia alcanza su valor máximo y se corresponde con el valor de tensión y corriente en el que el sistema opera de forma más eficiente. En un sistema fijo, el panel está diseñado para operar cerca de este punto durante las horas de mayor radiación solar (Jiménez, 2018).

Figura 17. Curva de la potencia en un módulo fotovoltaico



Fuente: (SUNFIELDS,2025)

Los sistemas con seguimiento solar permiten mantener los paneles en el punto de máxima potencia durante un mayor periodo del día, lo que mejora la eficiencia general. En estos sistemas, las curvas I-V y las curvas de potencia se mantienen más cercanas a sus valores óptimos, aumentando la producción de energía (García L. &., 2020).

2.10. Simulación horaria de rendimiento energético

La evaluación del rendimiento de un sistema fotovoltaico requiere una metodología que capture la variabilidad temporal de las condiciones de operación. La simulación horaria de rendimiento energético responde a esa necesidad mediante un procedimiento de cálculo secuencial que estima la producción eléctrica a partir de datos de irradiancia y temperatura registrados en intervalos discretos de tiempo.

Este procedimiento constituye el núcleo de cálculo sobre el que se basan herramientas computacionales de referencia internacional como PVGIS, desarrollada por el Joint Research

Centre de la Comisión Europea, y PVsyst, ampliamente utilizadas en la evaluación de sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.

El fundamento del método radica en la cadena causal de los fenómenos físicos que gobiernan la conversión fotovoltaica. La irradiancia solar y la temperatura de operación no son constantes a lo largo del día, sino que presentan variaciones continuas que afectan directamente la eficiencia de conversión del módulo es así que la irradiancia incidente determina la temperatura operativa del módulo, la cual condiciona la eficiencia de conversión del semiconductor; esta eficiencia, combinada con la irradiancia, define la potencia eléctrica instantánea generada en cada intervalo. Por ello, en lugar de asumir condiciones promedio o constantes, el método evalúa el sistema hora a hora de forma independiente, permitiendo obtener una representación más fiel del comportamiento real del sistema.

En primer lugar, se determina la temperatura operativa del módulo en función de la irradiancia incidente, empleando un modelo empírico basado en el parámetro NOCT, el cual es definido bajo condiciones estándar según la norma IEC 61215.

A partir de esta, se calcula la eficiencia instantánea de conversión mediante el modelo lineal de dependencia térmica propuesto por Evans (1981), el cual establece que la eficiencia del módulo varía linealmente con la temperatura de operación. Con ambos valores se obtiene la potencia eléctrica generada en cada intervalo horario y, finalmente, la integración temporal de esta potencia a lo largo del día proporciona la energía eléctrica diaria producida por el sistema.

2.11. Temperatura del módulo fotovoltaico

La temperatura del módulo fotovoltaico se estima en función de la temperatura ambiente y la irradiancia mediante el uso del parámetro NOCT. (Messenger, 2010; Duffie & Beckman, 2013).

$$T_{(c)}(t) = T_{amb} + \frac{G(t)}{800}(Noct - 20)$$

Donde:

$T_{(c)}$: temperatura del módulo (°C)

T_{amb} : temperatura ambiente (15 °C) en Cusco.

$G(t)$: irradiancia solar (W/m²)

Noct: temperatura nominal de operación (45 °C)

2.12. Eficiencia del módulo fotovoltaico

La eficiencia fotovoltaica se define como la relación entre la potencia eléctrica generada y la potencia de la radiación solar incidente. Sin embargo, esta eficiencia no es constante, ya que depende de la temperatura del módulo.

Representa la capacidad intrínseca del módulo para convertir energía solar en energía eléctrica; depende de las características del material semiconductor y de las condiciones de operación viéndose afectada principalmente por la temperatura del módulo. (Messenger, 2010; Twidell, 2015).

En el presente estudio, la eficiencia instantánea se modeló mediante una relación lineal:

$$\eta(t) = \eta_{stc}[1 - \beta(T_c(t) - 25)]$$

Donde:

η_{STC} : es la eficiencia en condiciones estándar

β : es el coeficiente térmico del módulo

2.13. Potencia eléctrica instantánea

La potencia eléctrica generada es la cantidad de energía eléctrica producida por el sistema fotovoltaico en un instante determinado. Conceptualmente, resulta de la interacción entre la irradiancia solar incidente y la eficiencia del módulo fotovoltaico.

La potencia instantánea permite describir el comportamiento dinámico del sistema a lo largo del día y sirve como base para el cálculo de la energía eléctrica total generada.

La potencia eléctrica generada por unidad de área se obtiene como el producto entre la irradiancia solar y la eficiencia instantánea del módulo:

$$P(t) = \eta(T_c) \times G(t) \times A$$

Esta ecuación integra simultáneamente: el recurso solar disponible, el comportamiento térmico del módulo, y la capacidad de conversión del sistema.

2.14. Energía eléctrica diaria generada

La energía eléctrica diaria generada corresponde a la acumulación de la potencia eléctrica producida durante un día completo. Este parámetro es el principal indicador de rendimiento energético de un sistema fotovoltaico.

La energía eléctrica diaria corresponde a la integración temporal de la potencia eléctrica instantánea:

$$E_{diaria} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt$$

Siendo la forma aproximada:

$$E_{diaria} \approx \sum_{i=1}^N P_i \times \Delta t$$

Esta magnitud representa el indicador principal de desempeño energético, ya que considera la variación temporal tanto de la irradiancia como de la eficiencia del módulo.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

Cuantitativa: Debido a que el análisis del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos se fundamenta en el uso de variables numéricas medibles, tales como irradiancia solar, energía eléctrica generada, eficiencia energética y potencia eléctrica instantánea.

El estudio emplea modelos matemáticos, fórmulas físicas y simulaciones computacionales desarrolladas en el entorno MATLAB, lo que permite obtener resultados expresados en valores numéricos y porcentuales, facilitando su análisis, interpretación y comparación objetiva entre un sistema fotovoltaico fijo y un sistema discreto de seguimiento solar

No experimental: La investigación se clasifica como no experimental, ya que no se manipulan deliberadamente las variables independientes ni se implementa físicamente el sistema de seguimiento solar sobre la infraestructura existente.

Las variables del estudio, como la irradiancia solar, la eficiencia del módulo y la energía generada, son analizadas tal como ocurren en condiciones reales o simuladas, a partir de perfiles de irradiancia previamente registrados y modelos matemáticos representativos del comportamiento del sistema fotovoltaico.

Descriptiva-comparativa: La investigación es de nivel descriptivo, ya que tiene como propósito caracterizar y cuantificar el comportamiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC, describiendo variables como:

- Perfil de irradiancia solar
- Eficiencia energética del sistema

- Energía eléctrica diaria generada

Se describe “cuánto produce” cada sistema y cómo varía su rendimiento a lo largo del día.

La investigación es además **comparativa**, debido a que se analizan **dos configuraciones distintas** de un mismo sistema fotovoltaico:

- Sistema fotovoltaico fijo
- Sistema fotovoltaico con seguimiento solar discreto

La comparación se realiza a partir de indicadores energéticos comunes, tales como la irradiación captada y la energía eléctrica generada diaria, permitiendo identificar diferencias cuantitativas en el rendimiento energético entre ambas configuraciones.

La comparación se basa en indicadores energéticos homogéneos, lo que garantiza la validez del análisis.

3.2. Diseño de la Investigación:

La presente investigación adopta un diseño **transversal**, debido a que el análisis del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos se realiza a partir de datos correspondientes a un único periodo de tiempo específico, sin considerar la evolución temporal del sistema a lo largo de diferentes años o estaciones.

En el estudio se emplea un perfil de irradiancia solar correspondiente a un día representativo, sobre el cual se evalúa el comportamiento energético del sistema fotovoltaico fijo y del sistema con seguimiento solar discreto. Ambos sistemas son analizados en las mismas condiciones temporales, lo que permite una comparación directa y homogénea de su rendimiento energético mediante la simulación computacional.

3.3. Materiales y Equipos:

3.3.1. *Materiales*

- **Paneles Solares Fotovoltaicos**

Tipo: Paneles de silicio monocristalino o policristalino, dependiendo del lugar de prueba.

3.3.2. *Equipos*

- **Sistemas de Seguimiento Solar**

Tipo: Se emplearán sistemas de seguimiento solar de un solo eje, los cuales posibilitarán que los paneles se orienten de manera óptima hacia el sol durante todo el día.

Controladores: Dispositivos electrónicos encargados de gestionar el motor del sistema de seguimiento y modificar la orientación de los paneles.

- **Inversores**

Función: Convertir la corriente continua (CC) producida por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es el tipo de electricidad utilizado en la mayoría de los hogares y edificios.

- **Sistemas de Monitoreo**

Medidores de Energía: Dispositivos que registren la cantidad de energía generada por los paneles solares.

Sistemas de Adquisición de Datos (DAQ) : Equipos para recolectar y almacenar datos provenientes de los sensores y medidores.

3.3.3. Software

Software de Monitoreo y Análisis: Herramientas que permiten visualizar y analizar los datos recopilados, facilitando la evaluación del rendimiento del sistema.

Cálculo de Simulaciones: Software para simular la producción de energía solar y prever el rendimiento del sistema basado en diferentes condiciones climáticas.

3.4. Procedimiento Experimental:

Formulación de propuestas claras, como "La implementación de sistemas discretos de seguimiento solar aumentará la producción de energía solar comparado con paneles fijos".

Se procederá con la implementación del sistema discreto de seguimiento solar en base a mediciones ya realizadas de la irradiancia de los paneles fijos disponibles.

Utilización de técnicas estadísticas para comparar los datos obtenidos de la simulación y determinar el impacto de los sistemas de seguimiento solar.

3.5. Recopilación de Datos:

3.5.1. Variables a Medir

Producción de Energía: Es la cantidad de energía generada por los paneles solares, expresada en kilovatios-hora (kWh).

Irradiancia Solar: Medición de la irradiancia solar en el lugar de instalación de los paneles fijos, utilizando piranómetros, sensores de radiación o softwares acoplados al sistema, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

Temperatura: Medición de la temperatura ambiente y la temperatura de los paneles solares, que puede influir en la eficiencia de la producción.

3.5.2. *Métodos de Recolección de Datos*

Monitoreo Continuo: Emplear sistemas de monitoreo automático que registren tanto la producción de energía como los datos ambientales en intervalos regulares, como cada hora. Esto puede implicar el uso de dispositivos como registradores de datos o sistemas SCADA (Control de Supervisión y Adquisición de Datos).

Uso de Software de Gestión: Un software especializado que combine los datos de producción y/o irradiación, lo que permitirá un análisis más eficiente en el presente trabajo.

3.6. Plan de análisis de Datos:

3.6.1. *Duración de la Recolección de Datos*

Período de Monitoreo: El fin es de capturar las variaciones estacionales en la producción de energía y garantizar la validez de los datos para una muestra, para este caso usaremos las mediciones obtenidas en un día.

3.6.2. *Organización de Datos*

Base de Datos: Implementar una base de datos estructurada estratégicamente para almacenar la información recolectada. Esto puede realizarse utilizando hojas de cálculo o bases de datos relacionales, lo que facilitará el acceso y el análisis posterior de los datos.

Clasificación: Se debe organizar los datos según la fecha, el tipo de medición y la ubicación (paneles con y sin seguimiento solar), lo que facilitará un análisis comparativo más eficiente.

3.6.3. *Análisis de Datos*

Análisis Estadístico: Se deben aplicar técnicas estadísticas para comparar la producción de energía entre los sistemas de seguimiento y los sistemas fijos, identificando patrones, promedios y/o desviaciones estándar.

Gráficos y Visualización: Es necesario utilizar herramientas de visualización de datos para representar gráficamente la producción de energía a lo largo del tiempo, destacando las diferencias entre los grupos de estudio.

3.7. Matriz de Consistencia

Tabla 4. Matriz de consistencia

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO MEDIANTE SISTEMAS DISCRETOS DE SEGUIMIENTO SOLAR EN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE LA UNSAAC 2025				
PROBLEMA	OBJETIVOS	CONCLUSIONES	METODOLOGIA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
PROBLEMA GENERAL ¿En qué medida varía el rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC al implementar un modelo de sistema discreto de seguimiento solar? PROBLEMAS ESPECÍFICOS 1. ¿Cuál es la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC como base para la comparación con el modelo de sistema discreto de seguimiento solar? 2. ¿Cuál es el impacto de la implementación de un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la mejora del rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC? 3. ¿Qué diferencia existe entre un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la producción de energía con respecto a los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC?	OBJETIVO GENERAL Evaluar la variación del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC al implementar un modelo de sistema discreto de seguimiento solar. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 1. Determinar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC como base para la comparación con los sistemas discretos de seguimiento solar. 2. Analizar el impacto de la implementación de un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la mejora del rendimiento energético en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC. 3. Analizar la diferencia que existe entre un modelo de sistema discreto de seguimiento solar en la producción de energía con respecto a los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC.	CONCLUSION GENERAL La implementación de un sistema discreto de seguimiento solar en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC incrementa el rendimiento energético del sistema, evidenciándose principalmente en el incremento de la energía eléctrica diaria generada respecto a un sistema fotovoltaico fijo. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS 1. La eficiencia del módulo fotovoltaico en los sistemas fijos de la UNSAAC se mantiene en un valor promedio aproximado de 0,17, constituyendo una línea base adecuada para la comparación energética con el sistema discreto de seguimiento solar. 2. La incorporación del sistema discreto de seguimiento solar no produce una variación significativa en la eficiencia intrínseca del módulo fotovoltaico; sin embargo, permite un mayor aprovechamiento de la irradiancia solar a lo largo del día. 3. El sistema discreto de seguimiento solar presenta un incremento aproximado del 32% al 38% en la energía eléctrica diaria generada en comparación con el sistema fotovoltaico fijo, debido al aumento de la irradiación captada.	TIPO DE INVESTIGACION • Cuantitativa NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN • Descriptiva /Comparativa DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN • Transversal	TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS • Análisis documental INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS • Fichas técnicas • Simulación por software MATLAB-SIMULINK • Procesamiento de información en Excel y MATLAB.

Fuente: (Elaboración propia)

3.8. Operacionalización de variables

Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables

Variables/Indicadores					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
VARIABLE DEPENDIENTE: Rendimiento energético fotovoltaico	El rendimiento energético fotovoltaico se define como la capacidad de un sistema fotovoltaico para convertir la energía solar en energía eléctrica útil durante un periodo determinado. Este rendimiento se evalúa principalmente a través de la energía eléctrica generada, la cual depende de la irradiación solar disponible, (Duffie & Beckman, 2013).	Producción de energía	Energía Diaria Generada	Wh/m^2	Simulación, Modelo matemático
		Captación solar	Irradiación solar captada	Wh/m^2	Modelo matemático, MATLAB
VARIABLE INDEPENDIENTE: Sistemas Discretos de seguimiento solar	Los sistemas discretos de seguimiento solar son configuraciones de orientación fotovoltaica que ajustan la posición angular de los módulos solares en intervalos definidos de tiempo, con el objetivo de aproximarse a la trayectoria del sol (Kalogirou, 2014).	Tipo de sistema	Sistema Fijo	Angulo en grados	Inspección visual, análisis técnico, documentación del sistema
			Sistema de seguimiento de 1 eje	Angulo en grados	

Fuente: (Elaboración propia)

CAPITULO 4: DIAGNOSTICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

4.1. Sistema de generación distribuida Ingeniería Eléctrica

El sistema que se tuvo en cuenta dentro de la UNSAAC es el sistema de generación distribuida (SGD) de la escuela profesional de ingeniería eléctrica con una capacidad de 14.85 kWp. Conformado con un arreglo solar de un total de 45 paneles solares estando 15 en serie y 3 en paralelo con una dimensión de 1956 x 992 x 40 mm con un área total de 87.3 metros cuadrados, con un soporte metálico tipo parking. Interconectado con la subestación eléctrica de Dolorespata con un nivel de tensión de 10.5 KV.

Fuente. 1. Sistema de Generación Distribuida Ingeniería Eléctrica UNSAAC 2025



Fuente: (Ingeniería Eléctrica, UNSAAC 2025)

4.2. Eficiencia energética en los sistemas fotovoltaicos de la UNSAAC

La eficiencia energética del sistema fotovoltaico fijo se determina a partir del comportamiento térmico del módulo y de sus características eléctricas nominales. Para cada intervalo horario, se estima la temperatura de operación del módulo en función de la irradiancia solar incidente y de la temperatura ambiente.

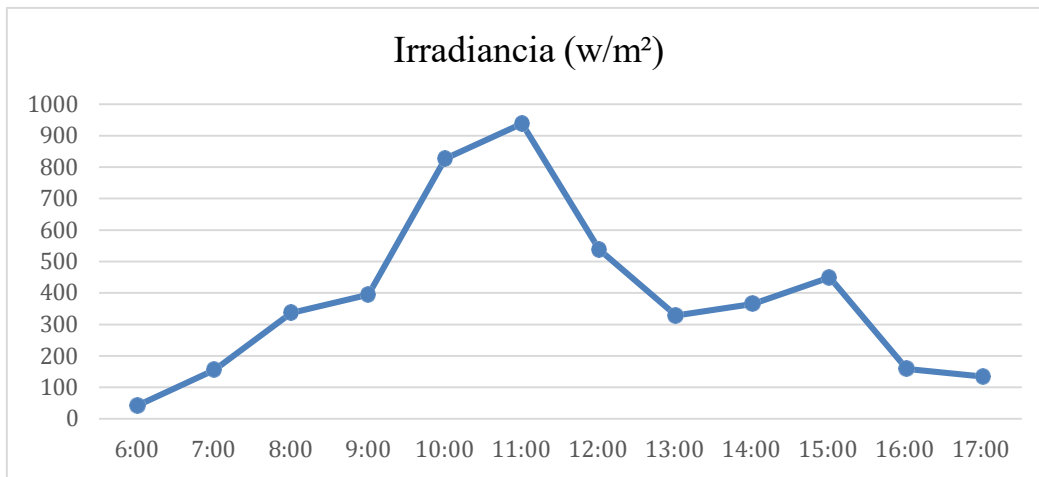
Una vez determinada la eficiencia instantánea del módulo fotovoltaico, se procede al cálculo de la potencia eléctrica generada en cada intervalo horario. La energía eléctrica diaria generada por el sistema fotovoltaico fijo se obtiene mediante la integración temporal de la potencia eléctrica a lo largo del día.

El criterio adoptado para la tarea de comparación de sistemas será la energía eléctrica diaria generada, ya que esta magnitud integra simultáneamente la irradiancia incidente, la eficiencia del módulo fotovoltaico y el tiempo de operación.

En consecuencia, la energía eléctrica diaria representa la cantidad total de energía útil producida por el sistema durante el periodo de análisis, siendo el parámetro más adecuado para la comparación global entre sistemas.

En la siguiente figura se muestra el perfil horario de irradiancia correspondiente al **Sistema de Generación Distribuida**, medido con un intervalo temporal de una hora en un día.

Figura 18. Perfil de irradiancia del SGD



Fuente: (Adaptado de R. Pacheco, 2024)

Se observa un comportamiento típico de un sistema fijo, con un incremento progresivo de la irradiancia durante la mañana, un máximo cercano al mediodía y una disminución hacia las horas de la tarde.

4.3. Energía diaria generada

A partir del perfil de irradiancia presentado en la anterior figura, se calculó la potencia eléctrica instantánea por unidad de área utilizando un modelo físico-térmico. Dicho modelo considera la influencia de la irradiancia sobre la temperatura del módulo y, a su vez, el efecto de la temperatura sobre la eficiencia del panel fotovoltaico.

Siendo la siguiente expresión que permitirá determinar dicho valor:

$$E = \sum \eta(t)G(t)\Delta t$$

E : energía eléctrica diaria (Wh/m²)

Δt : intervalo de tiempo (h)

Para determinar las variables se tendrá que realizar los siguientes cálculos

- ***Irradiancias diarias en el sistema de generación distribuida***

Irradiancia $G_A[k]$ en W/m^2 en un intervalo de tiempo de 1 hora.

Tabla 6. Perfil de irradiancia del SGD

Horario	Irradiancia (w/m ²)
6:00	43
7:00	156
8:00	337
9:00	395
10:00	828
11:00	939
12:00	539
13:00	329
14:00	366
15:00	450
16:00	159
17:00	135
Total	4676

Fuente: (Elaboración propia)

De los valores obtenidos se deduce que el área bajo la curva del perfil o la suma del total de irradiancia por un periodo de tiempo es la **irradiación diaria**.

Siendo $4676 \text{ Wh}/m^2 = 4.68 \text{ KWh}/m^2$

- ***Temperatura del módulo en el sistema de generación distribuida***

$$T_{(C)}(t) = T_{amb} + \frac{G(t)}{800} (Noct - 20)$$

Variables:

$T_{(C)}$: temperatura del módulo (°C)

T_{amb} : temperatura ambiente (15 °C) en Cusco

$G(t)$: irradiancia solar (W/m^2)

Noct: temperatura nominal de operación ($45\text{ }^\circ\text{C}$)

- ***Eficiencia instantánea del sistema de generación distribuida***

$$\eta(t) = \eta_{STC}[1 - \beta(T_c(t) - 25)]$$

Variables:

$\eta(t)$: eficiencia instantánea

η_{STC} : eficiencia nominal (0.17)

β : coeficiente térmico ($0.004\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

- ***Potencia eléctrica del Sistema Fotovoltaico Fijo***

$$P(t) = \eta(t)G(t) * \text{Área}$$

A continuación, se desarrollará el proceso para determinar la energía eléctrica generada para el sistema fotovoltaico fijo.

Tabla 7. Valores usados para el calculo

Valor	Descripción
0.17	Eficiencia nominal
0.004 / $^\circ\text{C}$	Coeficiente térmico
15 $^\circ\text{C}$	Temperatura ambiente (Cusco)
45 $^\circ\text{C}$	Temperatura NOCT
87.3 m^2	Área del campo FV

Fuente: (Elaboración propia)

- **Hora 6:00 | $G = 43 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (43/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.0537 \times 25$$

$$T_c = 15 + 1.3438$$

$$T_c = 16.34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (16.34 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -8.66]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.034640]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.034640$$

$$\eta = 0.17589$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17589 \times 43 \times 87.3$$

$$P = 660.26 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 660.26 \times 1$$

$$E = 660.26 \text{ Wh}$$

- **Hora 7:00 | $G = 156 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (156/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1950 \times 25$$

$$T_c = 15 + 4.8750$$

$$T_c = 19.88 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (19.88 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -5.12]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.020480]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.020480$$

$$\eta = 0.17349$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17349 \times 156 \times 87.3$$

$$P = 2362.66 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2362.66 \times 1$$

$$E = 2362.66 \text{ Wh}$$

- **Hora 8:00 | $G = 337 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (337/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4213 \times 25$$

$$T_c = 15 + 10.5313$$

$$T_c = 25.53 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (25.53 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 0.53]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.002120]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.997880$$

$$\eta = 0.16964$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16964 \times 337 \times 87.3$$

$$P = 4990.79 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 4990.79 \times 1$$

$$E = 4990.79 \text{ Wh}$$

- **Hora 9:00 | $G = 395 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (395/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4938 \times 25$$

$$T_c = 15 + 12.3438$$

$$T_c = 27.34 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (27.34 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 2.34]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.009360]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.990640$$

$$\eta = 0.16841$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16841 \times 395 \times 87.3$$

$$P = 5807.24 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 5807.24 \times 1$$

$$E = 5807.24 \text{ Wh}$$

- Hora 10:00 | $G = 828 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (828/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.0350 \times 25$$

$$T_c = 15 + 25.8750$$

$$T_c = 40.88 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (40.88 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 15.88]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.063520]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.936480$$

$$\eta = 0.15921$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15921 \times 828 \times 87.3$$

$$P = 11508.04 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 11508.04 \times 1$$

$$E = 11508.04 \text{ Wh}$$

- **Hora 11:00 | $G = 939 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (939/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1738 \times 25$$

$$T_c = 15 + 29.3438$$

$$T_c = 44.34 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (44.34 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 19.34]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.077360]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.922640$$

$$\eta = 0.15685$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15685 \times 939 \times 87.3$$

$$P = 12857.42 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12857.42 \times 1$$

$$E = 12857.42 \text{ Wh}$$

- **Hora 12:00 | $G = 539 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{\text{amb}} + (G/800) \times (\text{NOCT} - 20)$$

$$T_c = 15 + (539/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.6737 \times 25$$

$$T_c = 15 + 16.8438$$

$$T_c = 31.84 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (31.84 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 6.84]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.027360]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.972640$$

$$\eta = 0.16535$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16535 \times 539 \times 87.3$$

$$P = 7780.32 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 7780.32 \times 1$$

$$E = 7780.32 \text{ Wh}$$

- **Hora 13:00 | $G = 329 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (329/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4113 \times 25$$

$$T_c = 15 + 10.2813$$

$$T_c = 25.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (25.28 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 0.28]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.001120]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.998880$$

$$\eta = 0.16981$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16981 \times 329 \times 87.3$$

$$P = 4877.20 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 4877.20 \times 1$$

$$E = 4877.20 \text{ Wh}$$

- **Hora 14:00 | $G = 366 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (366/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4575 \times 25$$

$$T_c = 15 + 11.4375$$

$$T_c = 26.44 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (26.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 1.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.005760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.994240$$

$$\eta = 0.16902$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16902 \times 366 \times 87.3$$

$$P = 5400.57 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 5400.57 \times 1$$

$$E = 5400.57 \text{ Wh}$$

- **Hora 15:00 | $G = 450 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (450/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.5625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 14.0625$$

$$T_c = 29.06 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (29.06 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 4.06]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.016240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.983760$$

$$\eta = 0.16724$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16724 \times 450 \times 87.3$$

$$P = 6569.93 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 6569.93 \times 1$$

$$E = 6569.93 \text{ Wh}$$

- Hora 16:00 | $G = 159 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (159/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1988 \times 25$$

$$T_c = 15 + 4.9688$$

$$T_c = 19.97 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (19.97 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -5.03]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.020120]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.020120$$

$$\eta = 0.17342$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17342 \times 159 \times 87.3$$

$$P = 2407.21 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2407.21 \times 1$$

$$E = 2407.21 \text{ Wh}$$

- **Hora 17:00 | $G = 135 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (135/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1688 \times 25$$

$$T_c = 15 + 4.2188$$

$$T_c = 19.22 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (19.22 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -5.78]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.023120]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.023120$$

$$\eta = 0.17393$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17393 \times 135 \times 87.3$$

$$P = 2049.87 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 1 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2049.87 \times 1$$

$$E = 2049.87 \text{ Wh}$$

En la siguiente tabla se mostrará el resumen de los cálculos realizados con un script en Matlab.

Tabla 8. Resumen de cálculos para el sistema fijo

Hora	Irradiación (W/m ²)	Tc (°C)	Eficiencia	Potencia (W)	Energía (Wh)
6	43	16,34	0,17589	660,26	660,26
7	156	19,88	0,17349	2.362,66	2.362,66
8	337	25,53	0,16964	4.990,79	4.990,79
9	395	27,34	0,16841	5.807,24	5.807,24
10	828	40,88	0,15921	11.508,04	11.508,04
11	939	44,34	0,15685	12.857,42	12.857,42
12	539	31,84	0,16535	7.780,32	7.780,32
13	329	25,28	0,16981	4.877,20	4.877,20
14	366	26,44	0,16902	5.400,57	5.400,57
15	450	29,06	0,16724	6.569,93	6.569,93
16	159	19,97	0,17342	2.407,21	2.407,21
17	135	19,22	0,17393	2.049,87	2.049,87
TOTAL					67271,51

Fuente: (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos a partir del modelado y simulación muestran que la eficiencia instantánea del sistema fotovoltaico fijo se mantiene en un valor promedio aproximado de 0,17 a lo largo del día. Este comportamiento es consistente con las características técnicas del módulo fotovoltaico. Y si bien la eficiencia del módulo fotovoltaico presenta ligeras variaciones a lo largo del día debido al efecto de la temperatura, su valor promedio permanece relativamente constante. En este sentido, la eficiencia energética del sistema fotovoltaico fijo se encuentra principalmente determinada por las características intrínsecas del módulo y no por la orientación del sistema.

Por otro lado, la energía eléctrica diaria generada integra los efectos de la irradiancia solar y la eficiencia del módulo, constituyéndose en un indicador más representativo del rendimiento energético global del sistema. Los resultados obtenidos en este capítulo permiten establecer una línea base confiable para evaluar el impacto del sistema discreto de seguimiento solar, el cual será analizado en el capítulo siguiente.

CAPITULO 5: MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE LA UNSAAC

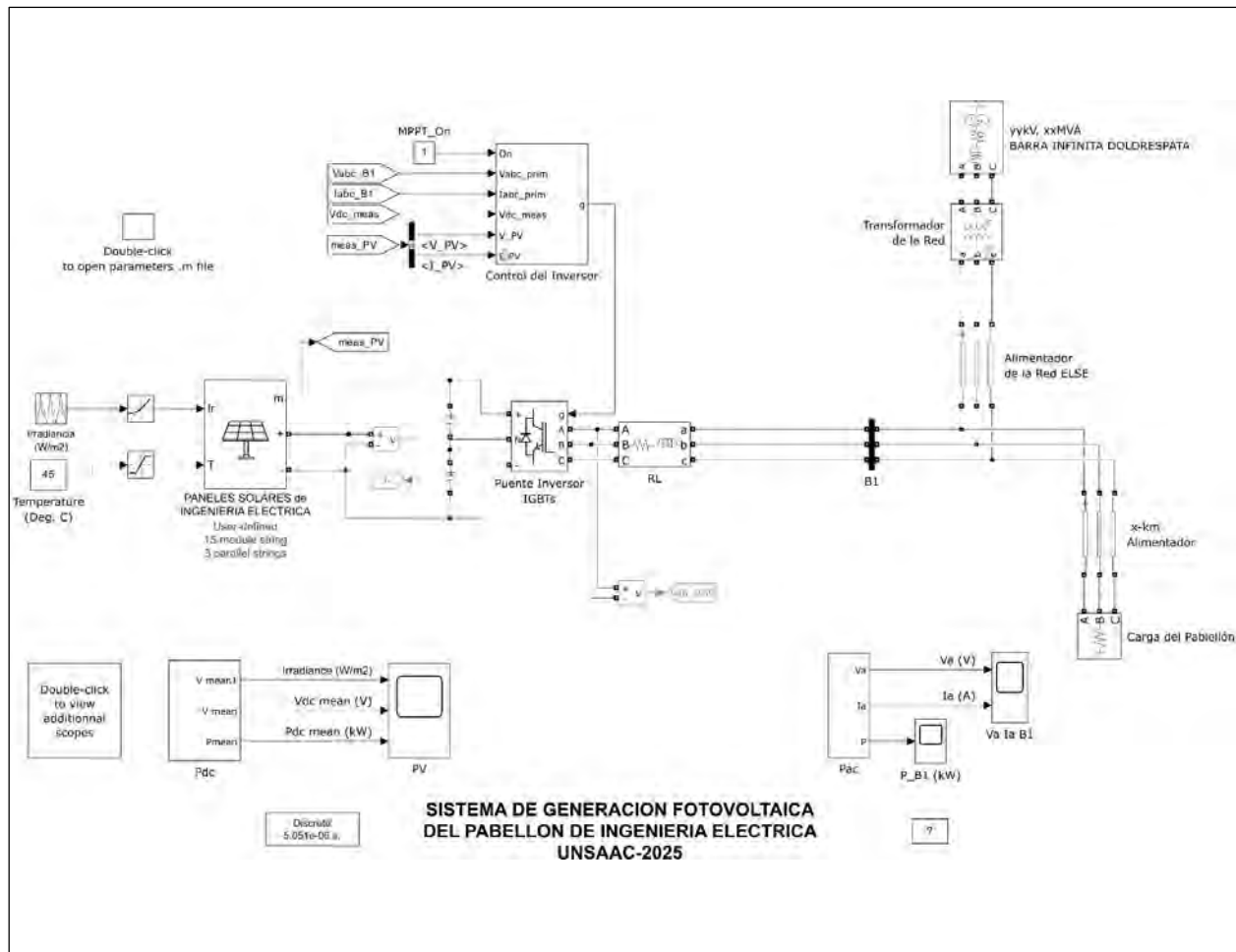
5.1. Sistema fotovoltaico del pabellón de ingeniería eléctrica

El sistema de generación distribuida de la escuela profesional de ingeniería eléctrica alimenta un total de 8 cargas las cuales se dividen en: la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Geológica (antiguo y nuevo), Ingeniería de Minas (antiguo y nuevo), Ingeniería Metalúrgica, Ingeniería Mecánica, la iluminación de las vías de tránsito, iluminación de parques y pasadizos y a la alimentación de celdas.

Como parte de la implementación del sistema de generación distribuida de la escuela profesional de ingeniería eléctrica en la UNSAAC 2025 se usó el software MATLAB, teniendo en cuenta cada elemento presente para su posterior simulación.

Dicho sistema implementado se muestra en la siguiente figura.

Figura 19. Modelo del sistema fotovoltaico de la UNSAAC



Fuente: (Elaboración propia)

5.2. Paneles solares

El conjunto de los 45 paneles se engloba en un bloque PV array que ofrece MATLAB. El modelo presente en la UNSAAC es un modelo AS-6P polycrystalline.

Figura 20. Sistema de Generación Distribuida de Ingeniería Eléctrica



Fuente: (Ingeniería Eléctrica, UNSAAC 2026)

Figura 21. Características técnicas del panel AS-6P



Fuente: (Ingeniería Eléctrica, UNSAAC 2026)

Los datos necesarios para su implementación en simulink se muestran en la siguiente tabla.

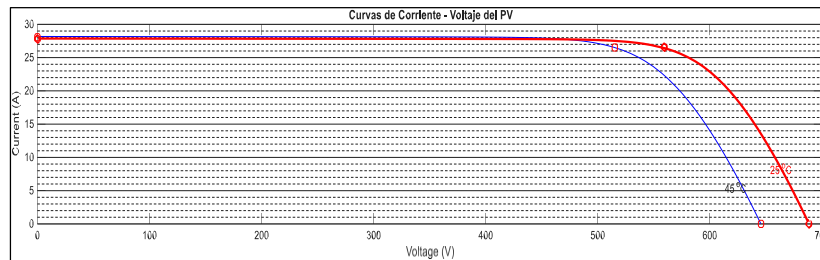
Tabla 9. Parámetros de los paneles solares del pabellón de ingeniería eléctrica

Parámetro	Valor
Pmax	330
Vmp	37,3
Imp	8,85
Voc	45,9
Isc	9,26
Numero de celdas	72
Coef. Temp. Voc	-0.31
Coef. Temp. Isc.	0.05
Dimensiones	1956 x 992 x 40

Fuente: (Amerisolar, New Energy New World)

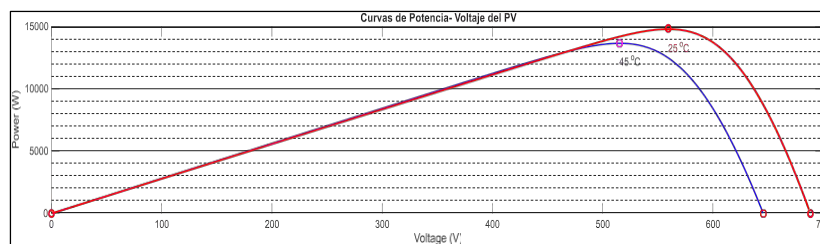
Las curvas características de la relación de Corriente vs Voltaje y la Potencia vs Voltaje, representando los puntos de operación y la cantidad de irradiancia respectivamente dentro del arreglo PV en el Simulink de Matlab.

Figura 22. Corriente vs Voltaje del modelo PV en Matlab



Fuente: (Elaboración propia)

Figura 23. Potencia vs Voltaje del modelo PV en Matlab



Fuente: (Elaboración propia)

Para la entrada y según diseño del sistema se hará uso de la irradiancia vs la hora obtenida de la medición de un día del sistema de generación distribuida de ingeniería eléctrica.

Tal como se muestra en la siguiente tabla.

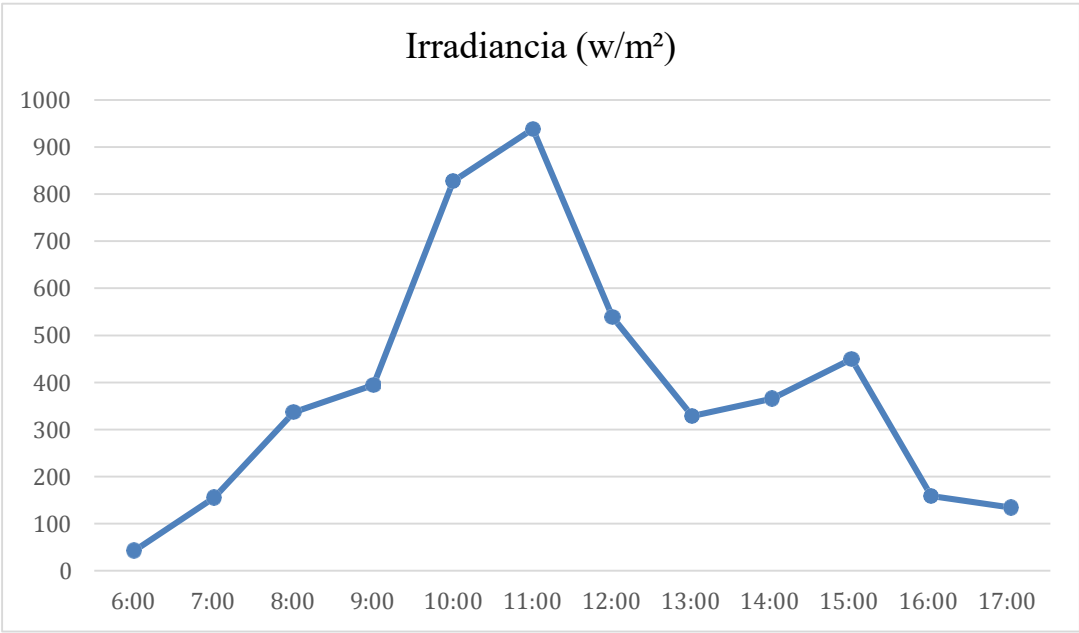
Tabla 10. Irradiancia del sistema fotovoltaico fijo

Horario	Irradiancia (w/m ²)
6:00	43
7:00	156
8:00	337
9:00	395
10:00	828
11:00	939
12:00	539
13:00	329
14:00	366
15:00	450
16:00	159
17:00	135

Fuente: (Adaptado de R. Pacheco, 2024)

Siendo la curva de irradiancia obtenida durante un total de 12 horas, como se muestra a continuación:

Figura 24. Irradiancia obtenida durante un periodo de tiempo



Fuente: (Adaptado de R. Pacheco, 2024)

5.3. Inversor del Sistema de Generación Distribuida

Como parte importante del sistema se encuentra el inversor de la red de tipo SMA MODELO STP 15000TL TRIFASICO.

Este componente es un equipo denominado inversor de corriente que tiene una máxima tensión en DC de 1000 V. y una potencia nominal de salida de 15000 W en AC.

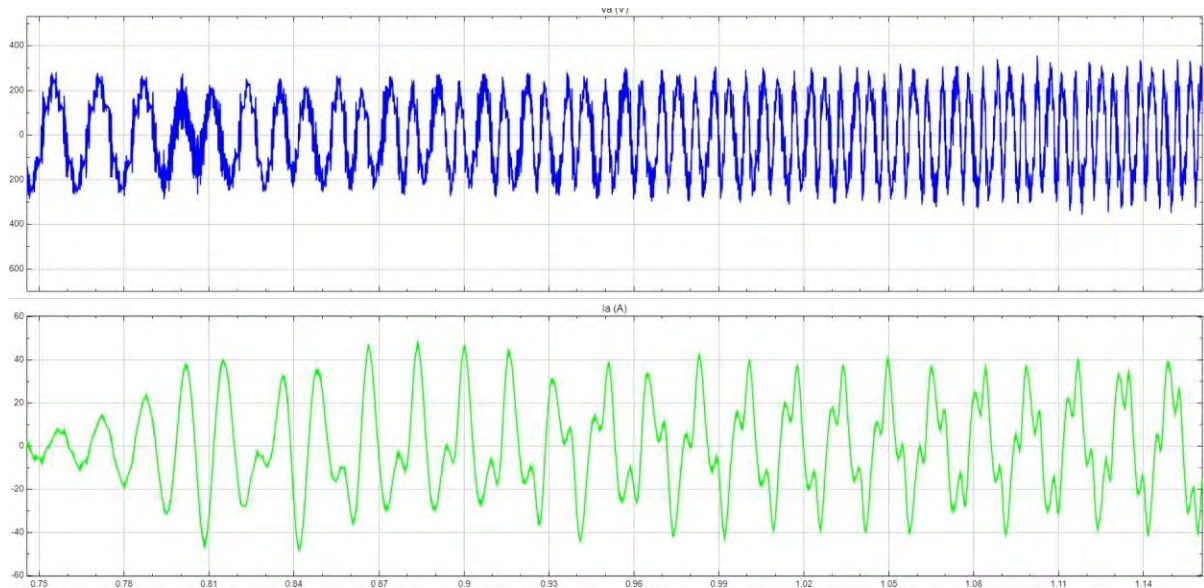
Para los fines descritos en la modelación del sistema de generación distribuida se dividió en dos partes para modelar el inversor STP 15000TL TRIFÁSICO.

El inversor fotovoltaico SMA STP-15000TL se modela mediante un puente trifásico de IGBTs con control de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) y un filtro RL de salida, representando su comportamiento como inversor de corriente conectado a red.

El sistema fotovoltaico emplea un puente inversor trifásico basado en IGBTs, el cual convierte la tensión continua proveniente del arreglo fotovoltaico en una señal de tensión alterna mediante conmutación electrónica.

Tal como se muestra en las siguientes curvas de la tensión y de la corriente.

Figura 25. Curvas de tensión y corriente del puente inversor IGBT

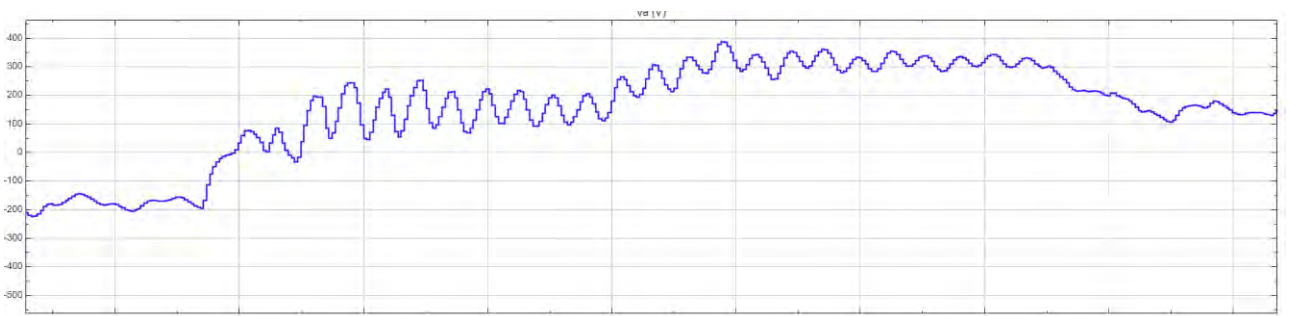


Fuente: (Elaboración propia)

Los IGBTs operan en régimen de encendido y apagado, por lo que no generan directamente una señal senoidal continua, sino una señal modulada por ancho de pulso (PWM).

Esto se observa claramente en la siguiente figura, donde la tensión presenta una forma escalonada típica de una señal PWM.

Figura 26. Curva de tensión del inversor IGBT entre líneas



Fuente: (Elaboración propia)

El resultado de esta forma escalonada se basa en la modulación PWM SENOIDAL, la modulación por Ancho de Pulso Senoidal (SPWM), por sus siglas en ingles (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) permite el control de inversores que convierten corriente continua (DC) en

corriente alterna (AC). Esta técnica se basa en el principio de comparación entre dos señales: una señal de referencia senoidal de baja frecuencia y una señal portadora triangular de alta frecuencia. Este método permite generar una señal de salida cuyo valor promedio sigue la forma de la onda senoidal deseada, mediante la modulación del ancho de pulsos rectangulares.

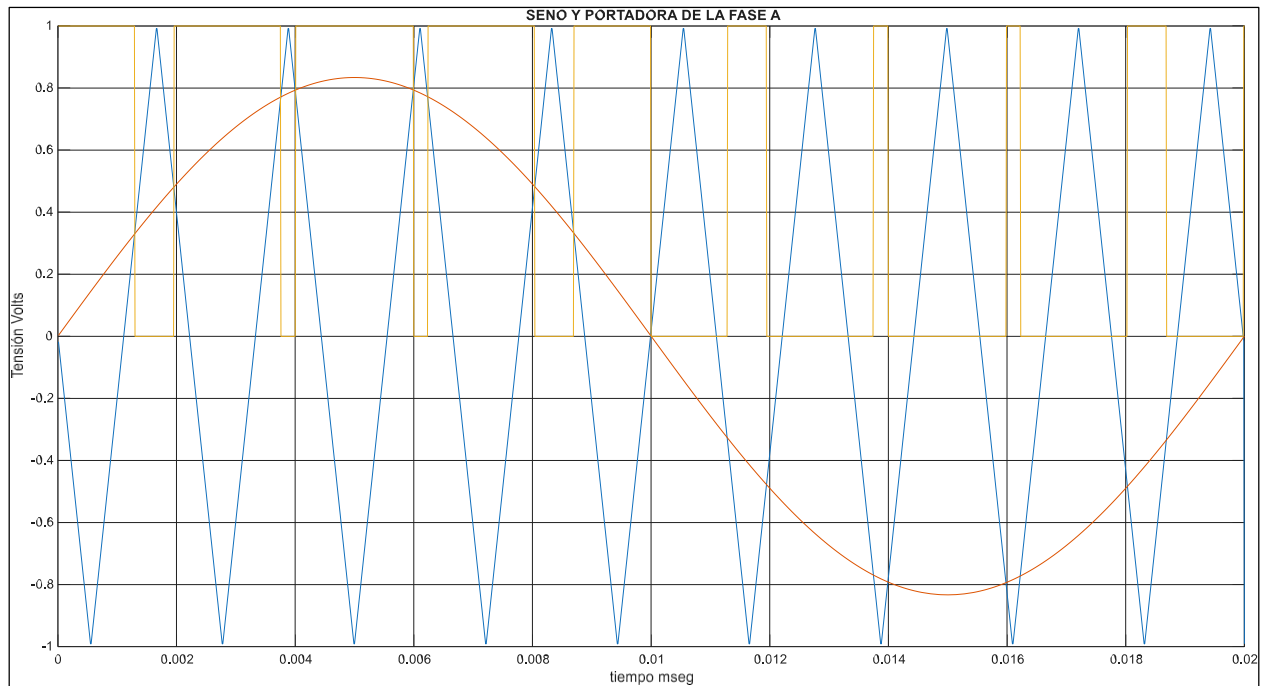
El proceso de generación de PWM mediante la técnica SPWM se fundamenta en la siguiente regla de comparación instantánea:

- Si $V_{\text{senoidal}} > V_{\text{triangular}} \rightarrow$ La salida PWM = VDC (Estado Alto)
- Si $V_{\text{senoidal}} < V_{\text{triangular}} \rightarrow$ La salida PWM = 0 (Estado Bajo)

Esta comparación se realiza de manera continua en cada instante de tiempo, generando una secuencia de pulsos cuyo ancho varía proporcionalmente a la amplitud instantánea de la señal senoidal de referencia. De esta forma, cuando la senoidal alcanza su valor máximo, los pulsos PWM son más anchos (mayor ciclo de trabajo), y cuando la senoidal se encuentra en valores bajos o negativos, los pulsos son más estrechos o incluso ausentes.

En la siguiente Figura se presenta una vista panorámica del proceso completo de modulación PWM senoidal, mostrando la interacción entre las tres señales fundamentales del sistema a lo largo de un ciclo completo de la onda senoidal.

Figura 27. Modulación PWM SENOIDAL



Fuente: (Elaboración propia)

Señal Senoidal de Referencia (naranja): Representa la forma de onda deseada a la salida del inversor. Con una frecuencia de 50 Hz y amplitud de 0.83 V, esta señal define el valor promedio que debe seguir la tensión de salida. La señal senoidal oscila entre +0.83 V y -0.83 V, completando un ciclo cada 20 milisegundos.

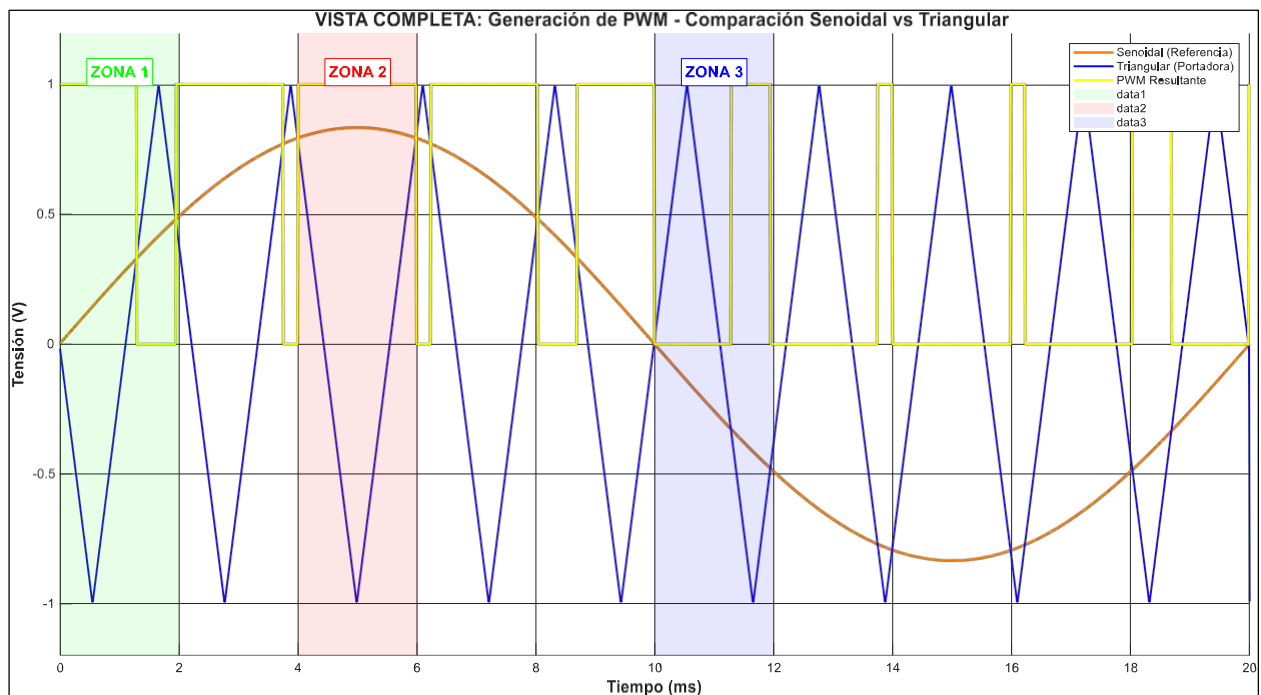
Señal Triangular Portadora (azul): Funciona como referencia temporal para la conmutación. Con una frecuencia de 450 Hz (9 veces mayor que la senoidal), esta señal oscila linealmente entre -1 V y +1 V. La alta frecuencia de la portadora triangular permite múltiples comparaciones durante cada ciclo de la senoidal, resultando en una mejor aproximación de la forma de onda deseada.

Señal PWM Resultante (amarilla): Es la señal de salida binaria que controla los interruptores del inversor. Esta señal toma únicamente dos valores: VDC (1 V) cuando la senoidal

supera a la triangular, y 0 V en caso contrario. La secuencia de pulsos generada tiene la propiedad de que su valor promedio reproduce la forma de la señal senoidal de referencia.

Para la compresión de la modulación PWM, dividiremos en 3 zonas el grafico como se muestra a continuación.

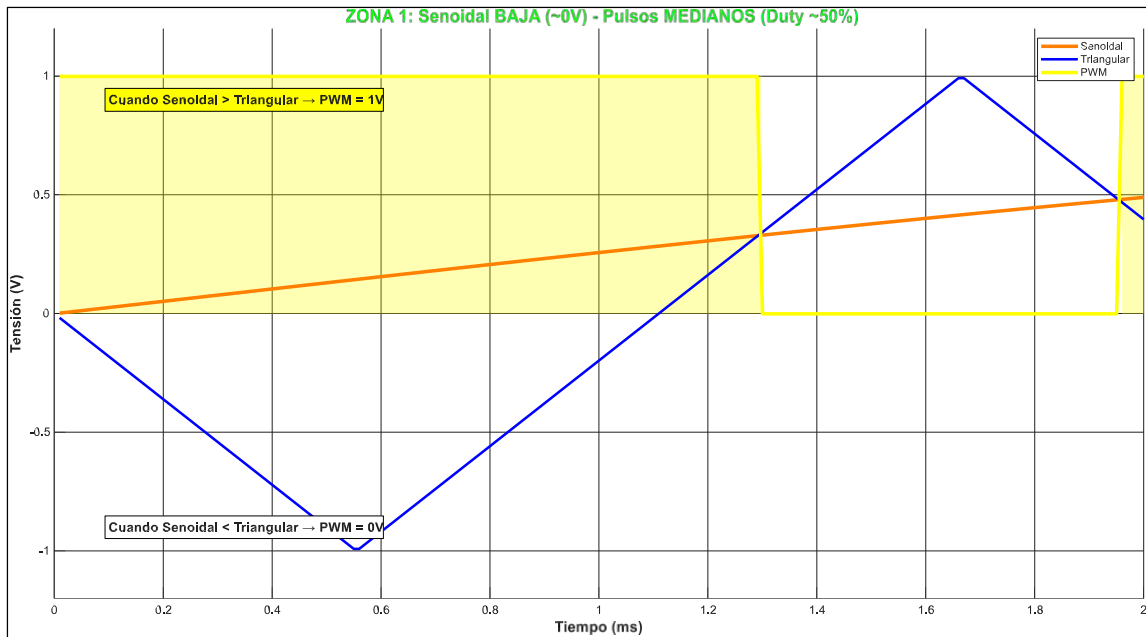
Figura 28. Vista general de la modulación PWM SENOIDAL



Fuente: (Elaboración propia)

La figura identifica tres regiones características del comportamiento del sistema, marcadas con diferentes colores de fondo:

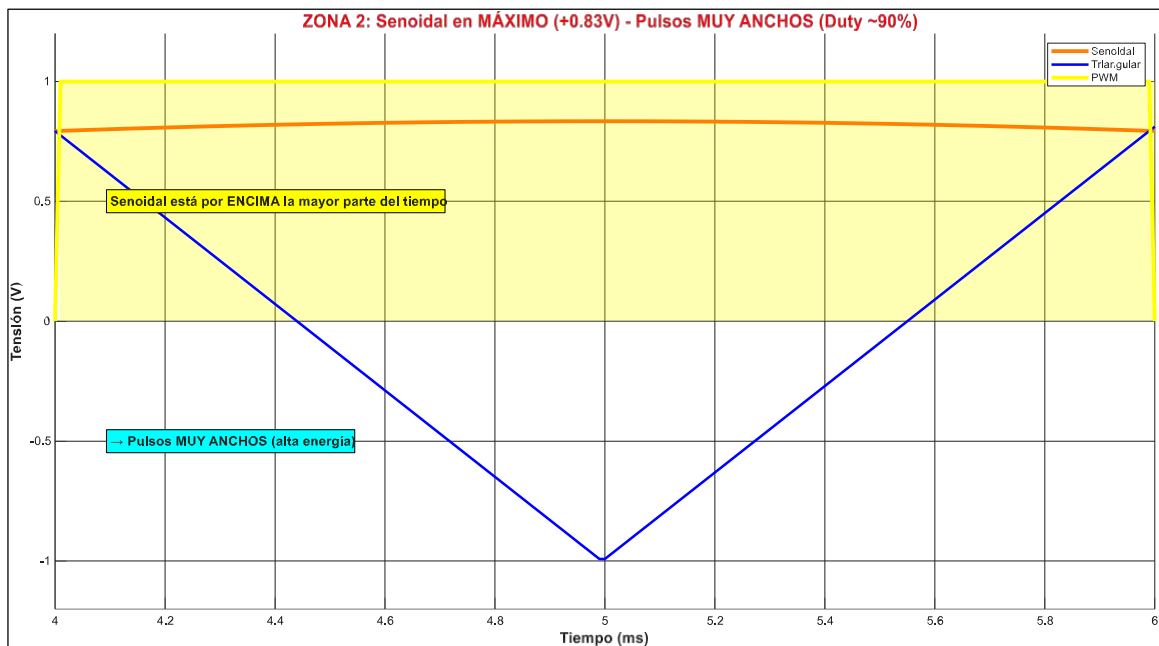
Figura 29. Zona 1 de la modulación PWM SENOIDAL



Fuente: (Elaboración propia)

Zona 1 (verde): Corresponde al cruce por cero ascendente de la senoidal. En esta región, la amplitud de la senoidal es aproximadamente 0 V, resultando en pulsos PWM de ancho medio.

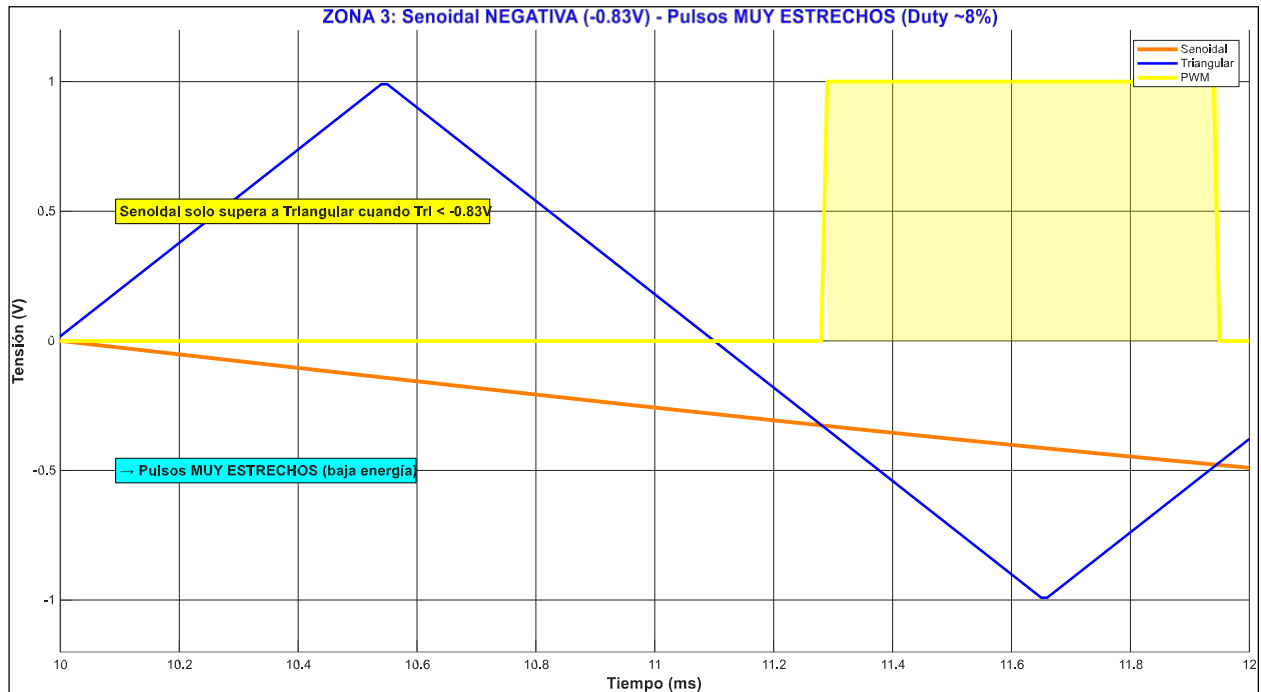
Figura 30. Zona 2 de la modulación PWM SENOIDAL



Fuente: (Elaboración propia)

Zona 2 (roja): Representa el máximo positivo de la senoidal (+0.83 V). Aquí se observan los pulsos PWM más anchos del ciclo, con un ciclo de trabajo aproximado del 90%.

Figura 31. Zona 3 de la modulación PWM SENOIDAL

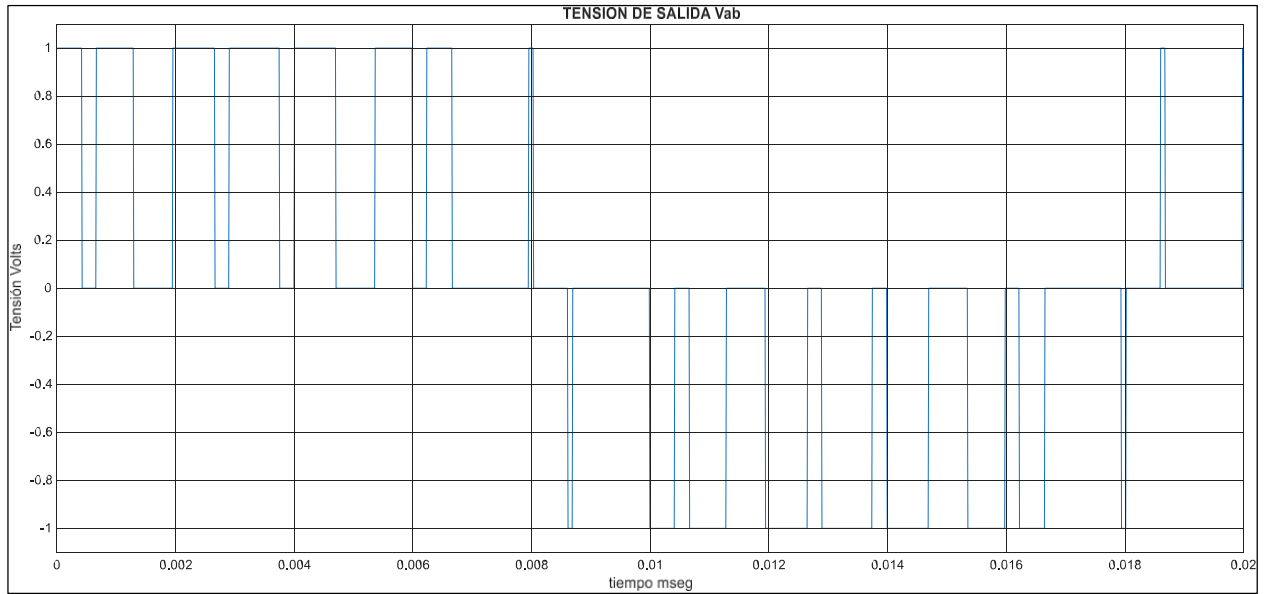


Fuente: (Elaboración propia)

Zona 3 (azul): Corresponde al semiciclo negativo de la senoidal (-0.83 V). En esta zona, los pulsos PWM son extremadamente estrechos, con un ciclo de trabajo de aproximadamente 8%.

Las señales escalonadas en los 3 niveles (+1, 0, -1) aparecen cuando se calcula o se grafica las tensiones de línea o de fases. Tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 32. Tensión entre fases



Fuente: (Elaboración propia)

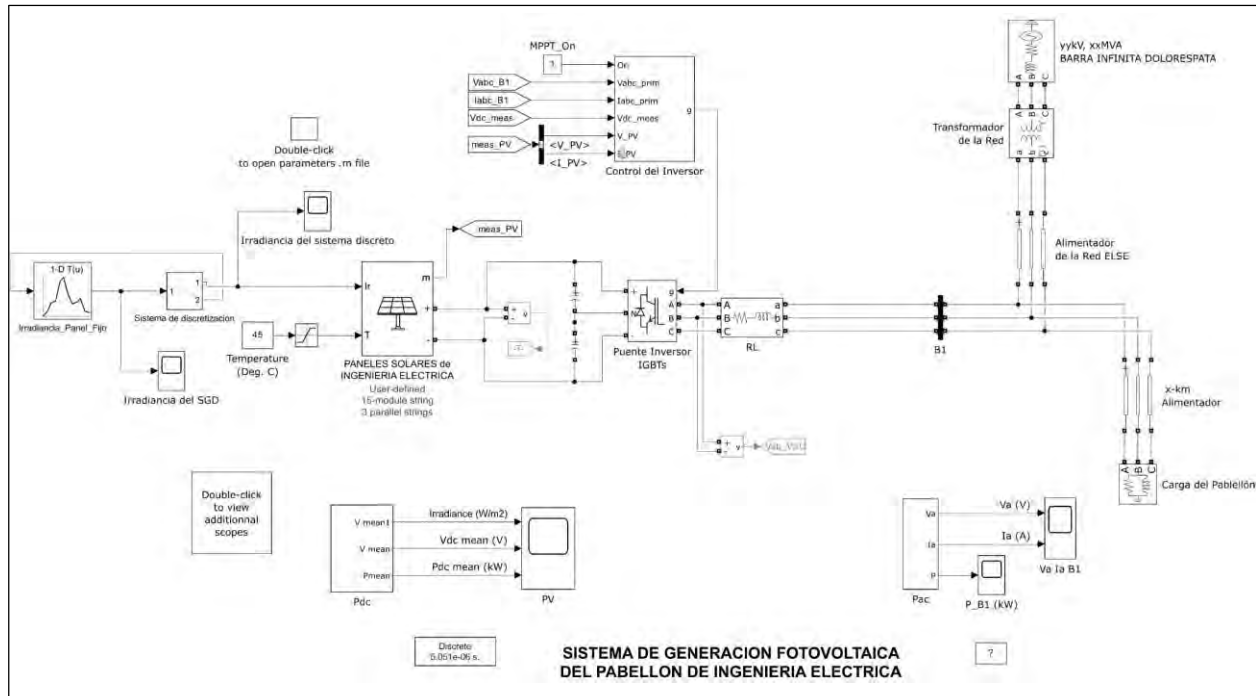
De esta forma, aunque cada fase individual solo genera pulsos unipolares (0 V o V_{DC}), las tensiones diferenciales entre fases pueden tomar valores positivos, negativos o nulos, permitiendo la síntesis completa de la forma de onda senoidal trifásica.

Y para modelar el inversor SMA STP-15000TL se le añadió un filtro de tipo RL, representando su comportamiento como inversor de corriente conectado a red.

5.4. Sistema de Generación Distribuida con sistema discreto de seguimiento solar

Al sistema de generación distribuida se le añadió una configuración conjunta como una modificación dinámica de la irradiancia incidente, dando como resultado nuevos resultados en las curvas de irradiancia que en este capítulo serán mostrados.

Figura 33. Sistema fotovoltaico con sistema discreto de seguimiento solar



Fuente: (Elaboración propia)

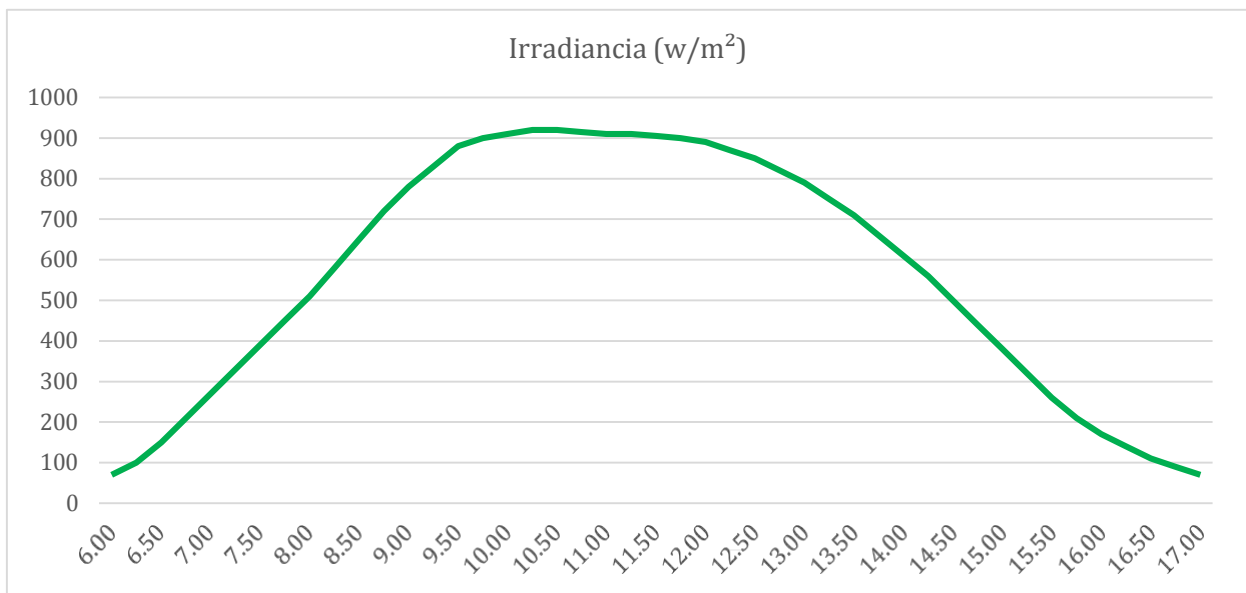
la siguiente figura presenta el perfil de irradiancia del Sistema de Generación Distribuida con la integración del sistema discreto de seguimiento solar; discretizado cada 15 minutos. Este perfil permite una representación más detallada de la variación temporal de la irradiancia, especialmente durante las horas de transición (mañana y tarde), lo que conduce a una mejor estimación de la energía acumulada.

El modelo de sistema discreto de seguimiento solar así como el Sistema de Generación Distribuida de la UNSAAC antes de ser simulado en Simulink tiene que contar con los datos necesarios para su correcto funcionamiento. En el anexo Script de conexión del modelo PV Array se encuentra el código en Matlab que debe de ser ejecutado y encarpetaado en el mismo directorio de ambos sistemas. Habiendo hecho este proceso el tiempo de simulación deberá de ser 11 debido a que desde las 06:00 de la mañana hasta las 16:00 de la tarde existe un lapso de 11 horas.

Una vez simulado en el scope de Irradiancia del Sistema discreto se podrá observar la nueva curva de irradiancia ofrecida con los datos de entrada de la irradiancia del sistema fotovoltaico fijo.

Dicha curva o perfil será la que usará el modelo de los paneles solares de Ingeniería Eléctrica para su conexión a la red.

Figura 34. Perfil de irradiancia del SGD con el sistema discreto de seguimiento solar



Fuente: (Elaboración propia)

En esta sección se desarrollará el análisis del sistema fotovoltaico con seguimiento solar discreto, aplicando el mismo procedimiento metodológico y las mismas condiciones de análisis. Esto permitirá realizar una comparación directa y objetiva entre ambos sistemas, enfocada en la variación de la energía eléctrica generada y en el impacto del seguimiento solar sobre el rendimiento energético.

Cálculos Detallados cada 15 minutos o 0.25 horas

- **Hora 6.00 | $G = 70 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (70/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.0875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 2.1875$$

$$T_c = 17.19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (17.19 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -7.81]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.031240]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.031240$$

$$\eta = 0.17531$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17531 \times 70 \times 87.3$$

$$P = 1071.33 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 1071.33 \times 0.25$$

$$E = 267.83 \text{ Wh}$$

- **Hora 6.25 | $G = 100 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (100/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 3.1250$$

$$T_c = 18.12 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (18.12 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -6.88]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.027520]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.027520$$

$$\eta = 0.17468$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17468 \times 100 \times 87.3$$

$$P = 1524.91 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 1524.91 \times 0.25$$

$$E = 381.23 \text{ Wh}$$

- **Hora 6.50 | $G = 150 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (150/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 4.6875$$

$$T_c = 19.69 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (19.69 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -5.31]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.021240]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.021240$$

$$\eta = 0.17361$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17361 \times 150 \times 87.3$$

$$P = 2273.46 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2273.46 \times 0.25$$

$$E = 568.36 \text{ Wh}$$

- **Hora 6.75 | $G = 210 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (210/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.2625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 6.5625$$

$$T_c = 21.56 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (21.56 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -3.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.013760]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.013760$$

$$\eta = 0.17234$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17234 \times 210 \times 87.3$$

$$P = 3159.46 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 3159.46 \times 0.25$$

$$E = 789.87 \text{ Wh}$$

- **Hora 7.00 | $G = 270 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (270/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.3375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 8.4375$$

$$T_c = 23.44 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (23.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -1.56]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.006240]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.006240$$

$$\eta = 0.17106$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17106 \times 270 \times 87.3$$

$$P = 4032.11 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 4032.11 \times 0.25$$

$$E = 1008.03 \text{ Wh}$$

- **Hora 7.25 | $G = 330 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (330/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4125 \times 25$$

$$T_c = 15 + 10.3125$$

$$T_c = 25.31 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (25.31 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 0.31]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.001240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.998760$$

$$\eta = 0.16979$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16979 \times 330 \times 87.3$$

$$P = 4891.41 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 4891.41 \times 0.25$$

$$E = 1222.85 \text{ Wh}$$

- **Hora 7.50 | $G = 390 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (390/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 12.1875$$

$$T_c = 27.19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (27.19 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 2.19]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.008760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.991240$$

$$\eta = 0.16851$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16851 \times 390 \times 87.3$$

$$P = 5737.35 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 5737.35 \times 0.25$$

$$E = 1434.34 \text{ Wh}$$

- **Hoa 7.75 | $G = 450 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{\text{amb}} + (G/800) \times (\text{NOCT} - 20)$$

$$T_c = 15 + (450/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.5625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 14.0625$$

$$T_c = 29.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (29.06 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 4.06]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.016240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.983760$$

$$\eta = 0.16724$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16724 \times 450 \times 87.3$$

$$P = 6569.93 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 6569.93 \times 0.25$$

$$E = 1642.48 \text{ Wh}$$

- **Hora 8.00 | $G = 510 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (510/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.6375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 15.9375$$

$$T_c = 30.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (30.94 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 5.94]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.023760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.976240$$

$$\eta = 0.16596$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16596 \times 510 \times 87.3$$

$$P = 7389.15 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 7389.15 \times 0.25$$

$$E = 1847.29 \text{ Wh}$$

- **Hora 8.25 | $G = 580 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (580/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.7250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 18.1250$$

$$T_c = 33.12 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (33.12 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 8.12]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.032480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.967520$$

$$\eta = 0.16448$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16448 \times 580 \times 87.3$$

$$P = 8328.03 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 8328.03 \times 0.25$$

$$E = 2082.01 \text{ Wh}$$

- **Hora 8.50 | $G = 650 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (650/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.8125 \times 25$$

$$T_c = 15 + 20.3125$$

$$T_c = 35.31 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (35.31 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 10.31]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.041240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.958760$$

$$\eta = 0.16299$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16299 \times 650 \times 87.3$$

$$P = 9248.73 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 9248.73 \times 0.25$$

$$E = 2312.18 \text{ Wh}$$

- Hora 8.75 | $G = 720 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (720/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.9000 \times 25$$

$$T_c = 15 + 22.5000$$

$$T_c = 37.50 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (37.50 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 12.50]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.050000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.950000$$

$$\eta = 0.16150$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16150 \times 720 \times 87.3$$

$$P = 10151.24 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 10151.24 \times 0.25$$

$$E = 2537.81 \text{ Wh}$$

- **Hora 9.00 | $G = 780 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (780/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.9750 \times 25$$

$$T_c = 15 + 24.3750$$

$$T_c = 39.38 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (39.38 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 14.38]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.057520]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.942480$$

$$\eta = 0.16023$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16023 \times 780 \times 87.3$$

$$P = 10910.36 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 10910.36 \times 0.25$$

$$E = 2727.59 \text{ Wh}$$

- **Hora 9.25 | $G = 830 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (830/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.0375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 25.9375$$

$$T_c = 40.94 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (40.94 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 15.94]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.063760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.936240$$

$$\eta = 0.15916$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15916 \times 830 \times 87.3$$

$$P = 11532.76 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 11532.76 \times 0.25$$

$$E = 2883.19 \text{ Wh}$$

- **Hora 9.50 | $G = 880 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (880/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1000 \times 25$$

$$T_c = 15 + 27.5000$$

$$T_c = 42.50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (42.50 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 17.50]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.070000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.930000$$

$$\eta = 0.15810$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15810 \times 880 \times 87.3$$

$$P = 12145.87 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12145.87 \times 0.25$$

$$E = 3036.47 \text{ Wh}$$

- **Hora 9.75 | $G = 900 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{\text{amb}} + (G/800) \times (\text{NOCT} - 20)$$

$$T_c = 15 + (900/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.1250$$

$$T_c = 43.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.12 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.12]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.072480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.927520$$

$$\eta = 0.15768$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15768 \times 900 \times 87.3$$

$$P = 12388.52 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12388.52 \times 0.25$$

$$E = 3097.13 \text{ Wh}$$

- **Hora 10.00 | $G = 910 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (910/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.4375$$

$$T_c = 43.44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.073760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.926240$$

$$\eta = 0.15746$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15746 \times 910 \times 87.3$$

$$P = 12509.29 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12509.29 \times 0.25$$

$$E = 3127.32 \text{ W}_h$$

- **Hora 10.25 | $G = 920 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (920/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1500 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.7500$$

$$T_c = 43.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.75 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.75]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.075000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.925000$$

$$\eta = 0.15725$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15725 \times 920 \times 87.3$$

$$P = 12629.69 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12629.69 \times 0.25$$

$$E = 3157.42 \text{ Wh}$$

- Hora 10.50 | $G = 920 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (920/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1500 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.7500$$

$$T_c = 43.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.75 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.75]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.075000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.925000$$

$$\eta = 0.15725$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15725 \times 920 \times 87.3$$

$$P = 12629.69 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12629.69 \times 0.25$$

$$E = 3157.42 \text{ Wh}$$

- **Hora 10.75 | $G = 915 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (915/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1438 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.5938$$

$$T_c = 43.59 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.59 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.59]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.074360]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.925640$$

$$\eta = 0.15736$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15736 \times 915 \times 87.3$$

$$P = 12569.54 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12569.54 \times 0.25$$

$$E = 3142.38 \text{ Wh}$$

- **Hora 11.00 | $G = 910 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (910/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.4375$$

$$T_c = 43.44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.073760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.926240$$

$$\eta = 0.15746$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15746 \times 910 \times 87.3$$

$$P = 12509.29 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12509.29 \times 0.25$$

$$E = 3127.32 \text{ Wh}$$

- **Hora 11.25 | $G = 910 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (910/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.4375$$

$$T_c = 43.44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.073760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.926240$$

$$\eta = 0.15746$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15746 \times 910 \times 87.3$$

$$P = 12509.29 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12509.29 \times 0.25$$

$$E = 3127.32 \text{ Wh}$$

- **Hora 11.50 | $G = 905 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{\text{amb}} + (G/800) \times (\text{NOCT} - 20)$$

$$T_c = 15 + (905/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1313 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.2813$$

$$T_c = 43.28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.28 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.28]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.073120]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.926880$$

$$\eta = 0.15757$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15757 \times 905 \times 87.3$$

$$P = 12448.96 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12448.96 \times 0.25$$

$$E = 3112.24 \text{ Wh}$$

- **Hora 11.75 | $G = 900 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (900/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 28.1250$$

$$T_c = 43.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (43.12 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 18.12]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.072480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.927520$$

$$\eta = 0.15768$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15768 \times 900 \times 87.3$$

$$P = 12388.52 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12388.52 \times 0.25$$

$$E = 3097.13 \text{ Wh}$$

- **Hora 12.00 | $G = 890 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (890/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.1125 \times 25$$

$$T_c = 15 + 27.8125$$

$$T_c = 42.81 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (42.81 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 17.81]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.071240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.928760$$

$$\eta = 0.15789$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15789 \times 890 \times 87.3$$

$$P = 12267.39 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12267.39 \times 0.25$$

$$E = 3066.85 \text{ Wh}$$

- Hora 12.25 | $G = 870 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (870/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.0875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 27.1875$$

$$T_c = 42.19 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (42.19 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 17.19]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.068760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.931240$$

$$\eta = 0.15831$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15831 \times 870 \times 87.3$$

$$P = 12023.99 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 12023.99 \times 0.25$$

$$E = 3006.00 \text{ Wh}$$

- **Hora 12.50 | $G = 850 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (850/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.0625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 26.5625$$

$$T_c = 41.56 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (41.56 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 16.56]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.066240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.933760$$

$$\eta = 0.15874$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15874 \times 850 \times 87.3$$

$$P = 11779.12 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 11779.12 \times 0.25$$

$$E = 2944.78 \text{ Wh}$$

- **Hora 12.75 | $G = 820 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (820/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 1.0250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 25.6250$$

$$T_c = 40.62 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (40.62 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 15.62]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.062480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.937520$$

$$\eta = 0.15938$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.15938 \times 820 \times 87.3$$

$$P = 11409.02 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 11409.02 \times 0.25$$

$$E = 2852.25 \text{ Wh}$$

- **Hora 13.00 | $G = 790 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (790/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.9875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 24.6875$$

$$T_c = 39.69 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (39.69 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 14.69]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.058760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.941240$$

$$\eta = 0.16001$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16001 \times 790 \times 87.3$$

$$P = 11035.58 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 11035.58 \times 0.25$$

$$E = 2758.90 \text{ Wh}$$

- **Hora 13.25 | $G = 750 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (750/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.9375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 23.4375$$

$$T_c = 38.44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (38.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 13.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.053760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.946240$$

$$\eta = 0.16086$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16086 \times 750 \times 87.3$$

$$P = 10532.47 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 10532.47 \times 0.25$$

$$E = 2633.12 \text{ Wh}$$

- **Hora 13.50 | $G = 710 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (710/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.8875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 22.1875$$

$$T_c = 37.19 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (37.19 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 12.19]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.048760]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.951240$$

$$\eta = 0.16171$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16171 \times 710 \times 87.3$$

$$P = 10023.43 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 10023.43 \times 0.25$$

$$E = 2505.86 \text{ Wh}$$

- Hora 13.75 | $G = 660 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (660/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.8250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 20.6250$$

$$T_c = 35.62 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (35.62 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 10.62]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.042480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.957520$$

$$\eta = 0.16278$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16278 \times 660 \times 87.3$$

$$P = 9378.77 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 9378.77 \times 0.25$$

$$E = 2344.69 \text{ Wh}$$

- **Hora 14.00 | $G = 610 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (610/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.7625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 19.0625$$

$$T_c = 34.06 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (34.06 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 9.06]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.036240]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.963760$$

$$\eta = 0.16384$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16384 \times 610 \times 87.3$$

$$P = 8724.84 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 8724.84 \times 0.25$$

$$E = 2181.21 \text{ Wh}$$

- **Hora 14.25 | $G = 560 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (560/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.7000 \times 25$$

$$T_c = 15 + 17.5000$$

$$T_c = 32.50 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (32.50 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 7.50]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.030000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.970000$$

$$\eta = 0.16490$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16490 \times 560 \times 87.3$$

$$P = 8061.63 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 8061.63 \times 0.25$$

$$E = 2015.41 \text{ Wh}$$

- **Hora 14.50 | $G = 500 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (500/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.6250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 15.6250$$

$$T_c = 30.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (30.62 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 5.62]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.022480]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.977520$$

$$\eta = 0.16618$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16618 \times 500 \times 87.3$$

$$P = 7253.54 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 7253.54 \times 0.25$$

$$E = 1813.38 \text{ Wh}$$

- **Hora 14.75 | $G = 440 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (440/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.5500 \times 25$$

$$T_c = 15 + 13.7500$$

$$T_c = 28.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (28.75 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 3.75]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.015000]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.985000$$

$$\eta = 0.16745$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16745 \times 440 \times 87.3$$

$$P = 6432.09 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 6432.09 \times 0.25$$

$$E = 1608.02 \text{ Wh}$$

- **Hora 15.00 | $G = 380 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (380/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4750 \times 25$$

$$T_c = 15 + 11.8750$$

$$T_c = 26.88 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (26.88 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 1.88]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.007520]$$

$$\eta = 0.17 \times 0.992480$$

$$\eta = 0.16873$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.16873 \times 380 \times 87.3$$

$$P = 5597.28 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 5597.28 \times 0.25$$

$$E = 1399.32 \text{ Wh}$$

- Hora 15.25 | $G = 320 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (320/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.4000 \times 25$$

$$T_c = 15 + 10.0000$$

$$T_c = 25.00 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (25.00 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times 0.00]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.000000]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.000000$$

$$\eta = 0.17000$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17000 \times 320 \times 87.3$$

$$P = 4749.12 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 4749.12 \times 0.25$$

$$E = 1187.28 \text{ Wh}$$

- **Hora 15.50 | $G = 260 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (260/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.3250 \times 25$$

$$T_c = 15 + 8.1250$$

$$T_c = 23.12 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (23.12 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -1.88]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.007520]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.007520$$

$$\eta = 0.17128$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17128 \times 260 \times 87.3$$

$$P = 3887.60 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 3887.60 \times 0.25$$

$$E = 971.90 \text{ Wh}$$

- **Hora 15.75 | $G = 210 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (210/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.2625 \times 25$$

$$T_c = 15 + 6.5625$$

$$T_c = 21.56 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (21.56 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -3.44]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.013760]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.013760$$

$$\eta = 0.17234$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17234 \times 210 \times 87.3$$

$$P = 3159.46 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 3159.46 \times 0.25$$

$$E = 789.87 \text{ Wh}$$

- **Hora 16.00 | $G = 170 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (170/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.2125 \times 25$$

$$T_c = 15 + 5.3125$$

$$T_c = 20.31 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (20.31 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -4.69]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.018760]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.018760$$

$$\eta = 0.17319$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17319 \times 170 \times 87.3$$

$$P = 2570.28 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2570.28 \times 0.25$$

$$E = 642.57 \text{ Wh}$$

- Hora 16.25 | $G = 140 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{\text{amb}} + (G/800) \times (\text{NOCT} - 20)$$

$$T_c = 15 + (140/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1750 \times 25$$

$$T_c = 15 + 4.3750$$

$$T_c = 19.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{\text{STC}} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (19.38 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -5.62]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.022480]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.022480$$

$$\eta = 0.17383$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17383 \times 140 \times 87.3$$

$$P = 2124.49 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 2124.49 \times 0.25$$

$$E = 531.12 \text{ Wh}$$

- **Hora 16.50 | $G = 110 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (110/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1375 \times 25$$

$$T_c = 15 + 3.4375$$

$$T_c = 18.44 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (18.44 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -6.56]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.026240]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.026240$$

$$\eta = 0.17446$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17446 \times 110 \times 87.3$$

$$P = 1675.36 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25$ h:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 1675.36 \times 0.25$$

$$E = 418.84 \text{ Wh}$$

- **Hora 16.75 | $G = 90 \text{ W/m}^2$**

1) Temperatura del módulo (T_c):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (90/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.1125 \times 25$$

$$T_c = 15 + 2.8125$$

$$T_c = 17.81 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (17.81 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -7.19]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.028760]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.028760$$

$$\eta = 0.17489$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17489 \times 90 \times 87.3$$

$$P = 1374.09 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 1374.09 \times 0.25$$

$$E = 343.52 \text{ Wh}$$

- Hora 17.00 | $G = 70 \text{ W/m}^2$

1) Temperatura del módulo (Tc):

$$T_c = T_{amb} + (G/800) \times (NOCT - 20)$$

$$T_c = 15 + (70/800) \times (45 - 20)$$

$$T_c = 15 + 0.0875 \times 25$$

$$T_c = 15 + 2.1875$$

$$T_c = 17.19 \text{ °C}$$

2) Eficiencia del módulo (η):

$$\eta = \eta_{STC} \times [1 - \beta \times (T_c - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times (17.19 - 25)]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - 0.004 \times -7.81]$$

$$\eta = 0.17 \times [1 - -0.031240]$$

$$\eta = 0.17 \times 1.031240$$

$$\eta = 0.17531$$

3) Potencia generada (P):

$$P = \eta \times G \times A$$

$$P = 0.17531 \times 70 \times 87.3$$

$$P = 1071.33 \text{ W}$$

4) Energía generada (E) — $\Delta t = 0.25 \text{ h}$:

$$E = P \times \Delta t$$

$$E = 1071.33 \times 0.25$$

$$E = 267.83 \text{ Wh}$$

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los cálculos realizados

Tabla 11. Resumen de cálculos para el sistema fotovoltaico con seguimiento solar

Hora	Irradiación (W/m ²)	Tc (°C)	Eficiencia	Potencia (W)	Energía (Wh)
6	70	17,19	0,17531	1.071,33	267,83
6,25	100	18,12	0,17468	1.524,91	381,23
6,5	150	19,69	0,17361	2.273,46	568,36
6,75	210	21,56	0,17234	3.159,46	789,87
7	270	23,44	0,17106	4.032,11	1.008,03
7,25	330	25,31	0,16979	4.891,41	1.222,85
7,5	390	27,19	0,16851	5.737,35	1.434,34
7,75	450	29,06	0,16724	6.569,93	1.642,48
8	510	30,94	0,16596	7.389,15	1.847,29
8,25	580	33,12	0,16448	8.328,03	2.082,01
8,5	650	35,31	0,16299	9.248,73	2.312,18
8,75	720	37,5	0,1615	10.151,24	2.537,81
9	780	39,38	0,16023	10.910,36	2.727,59
9,25	830	40,94	0,15916	11.532,76	2.883,19
9,5	880	42,5	0,1581	12.145,87	3.036,47

9,75	900	43,12	0,15768	12.388,52	3.097,13
10	910	43,44	0,15746	12.509,29	3.127,32
10,25	920	43,75	0,15725	12.629,69	3.157,42
10,5	920	43,75	0,15725	12.629,69	3.157,42
10,75	915	43,59	0,15736	12.569,54	3.142,38
11	910	43,44	0,15746	12.509,29	3.127,32
11,25	910	43,44	0,15746	12.509,29	3.127,32
11,5	905	43,28	0,15757	12.448,96	3.112,24
11,75	900	43,12	0,15768	12.388,52	3.097,13
12	890	42,81	0,15789	12.267,39	3.066,85
12,25	870	42,19	0,15831	12.023,99	3.006,00
12,5	850	41,56	0,15874	11.779,12	2.944,78
12,75	820	40,62	0,15938	11.409,02	2.852,25
13	790	39,69	0,16001	11.035,58	2.758,90
13,25	750	38,44	0,16086	10.532,47	2.633,12
13,5	710	37,19	0,16171	10.023,43	2.505,86
13,75	660	35,62	0,16278	9.378,77	2.344,69
14	610	34,06	0,16384	8.724,84	2.181,21
14,25	560	32,5	0,1649	8.061,63	2.015,41
14,5	500	30,62	0,16618	7.253,54	1.813,38
14,75	440	28,75	0,16745	6.432,09	1.608,02
15	380	26,88	0,16873	5.597,28	1.399,32
15,25	320	25	0,17	4.749,12	1.187,28
15,5	260	23,12	0,17128	3.887,60	971,9
15,75	210	21,56	0,17234	3.159,46	789,87
16	170	20,31	0,17319	2.570,28	642,57
16,25	140	19,38	0,17383	2.124,49	531,12
16,5	110	18,44	0,17446	1.675,36	418,84
16,75	90	17,81	0,17489	1.374,09	343,52
17	70	17,19	0,17531	1.071,33	267,83
TOTAL					89169,93

Fuente: (Elaboración propia)

Habiendo calculado los valores de la energía diaria producida para el sistema fotovoltaico fijo y el sistema discreto de seguimiento solar vistas en la siguiente tabla.

Tabla 12. Resumen de los cálculos realizados para cada sistema

Variable	Sistema Fotovoltaico Fijo	Variable	Sistema Fotovoltaico de Seguimiento Solar
Energia total generada [Wh]	67271.49	Energia total generada [Wh]	89169.95
Energia total generada [kWh]	67.2715	Energia total generada [kWh]	89.1699
Paso temporal [h]	1.00	Paso temporal [h]	0.25
Nº registros	12	Nº registros	45

Fuente: (Elaboración propia)

Los resultados muestran que la eficiencia promedio del módulo fotovoltaico es similar en ambos sistemas, con valores cercanos a 0.17. Sin embargo, la energía eléctrica generada difiere entre ambos casos, debido a que el sistema discreto de seguimiento solar permite un mayor aprovechamiento del recurso solar a lo largo del día.

CAPITULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1. Producción de energía diaria

La mejora porcentual se determinará de la siguiente manera de los datos de la tabla 11:

$$\%Produccion = \frac{E_{seguimiento\ solar} - E_{fijo}}{E_{fijo}} \times 100\%$$

$$\%Produccion = \frac{89.1699 - 67.2715}{67.2715} \times 100\%$$

$$\%Produccion = \frac{21.8984}{68,28897582} \times 100\%$$

$$\%Produccion \approx 32\%$$

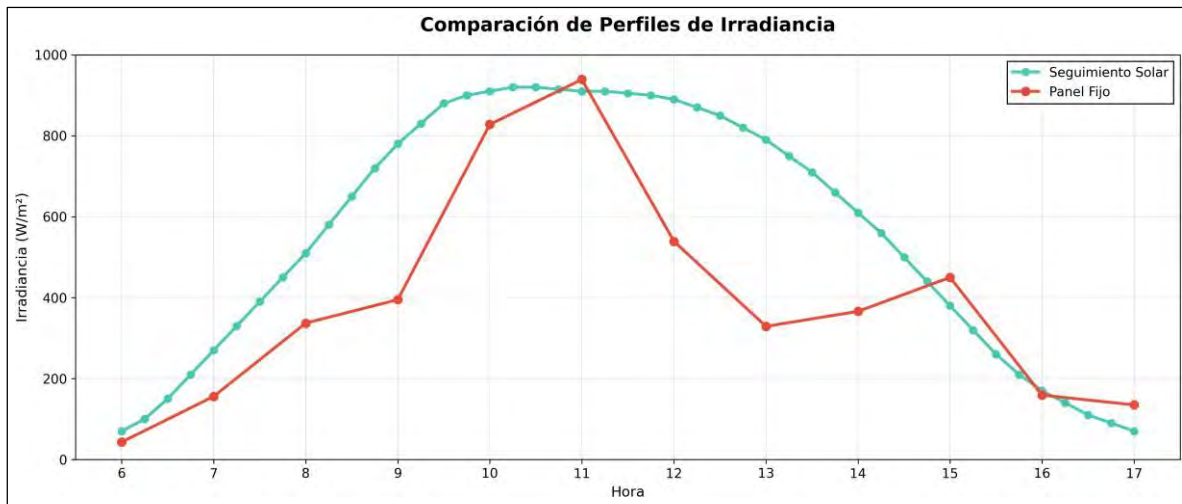
El desempeño energético muestra un incremento aproximado del **32 % en la energía eléctrica producida**. La mejora obtenida se debe principalmente a un perfil de irradiancia más favorable y a una mejor representación temporal del recurso solar, y no a un aumento de la eficiencia nominal del módulo.

Existe otra manera de determinar la producción de energía, en la siguiente figura compararemos ambos perfiles de irradiancia.

Desde un punto de vista físico, el área bajo la curva de potencia eléctrica en función del tiempo representa la energía eléctrica total generada por el sistema fotovoltaico durante el periodo analizado. Por esta razón, el análisis basado en el área bajo la curva constituye un criterio válido para evaluar y comparar el rendimiento energético de distintos sistemas fotovoltaicos.

En la siguiente figura se hizo una interpolación de horarios para superponer las curvas de la irradiancia obtenidas en los capítulos anteriores

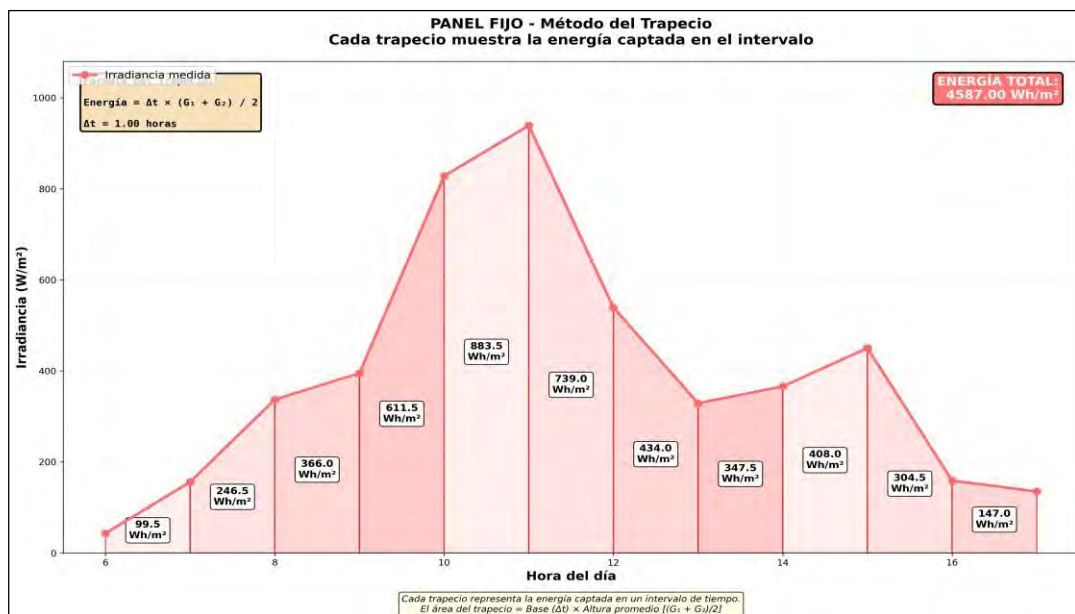
Figura 35. Comparación de perfiles de irradiancia de ambos sistemas



Fuente: (Elaboración propia)

El área en blanco será la diferencia que existe entre ambas curvas; es la energía extra capaz de generar el sistema con seguimiento solar. Para ello se aplica la regla del trapecio para calcular la energía total. Cada trapecio representa el área de energía captada en un intervalo de tiempo específico. Así como muestra la siguiente figura.

Figura 36. Método del trapecio para el perfil del sistema fijo



Fuente: (Elaboración propia)

Los cálculos se muestran en la siguiente tabla.

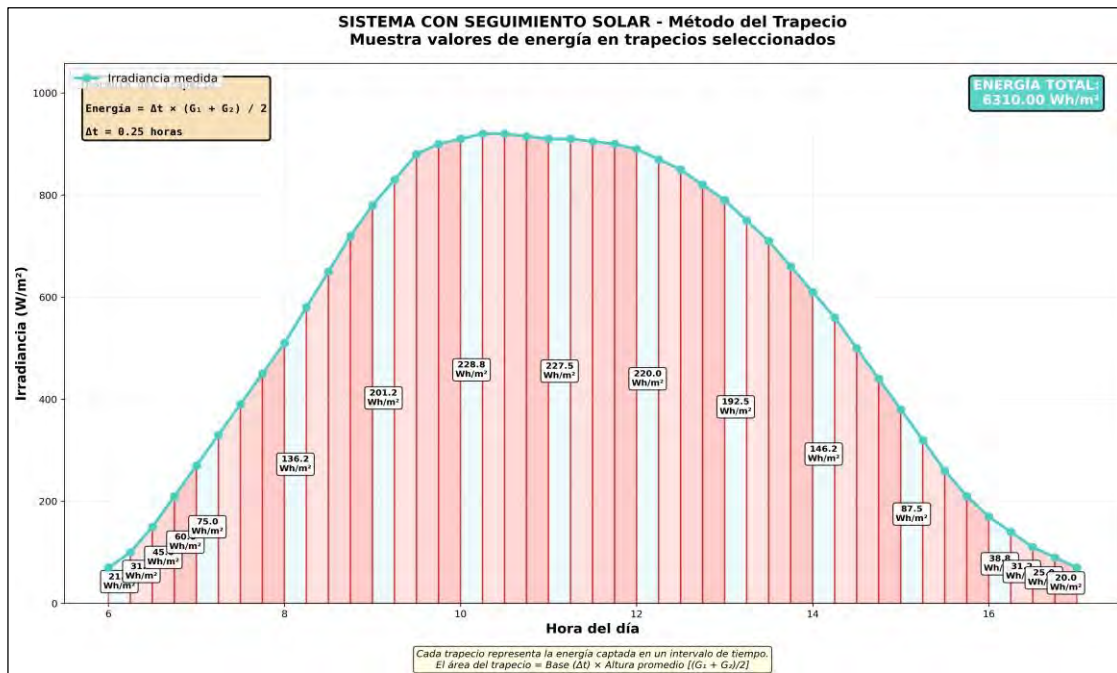
Tabla 13. Resumen de los cálculos de cada trapecio del perfil del sistema fijo

Intervalo	Δt (h)	G_1 (W/m ²)	G_2 (W/m ²)	Promedio (W/m ²)	Energía (Wh/m ²)
6.00 - 7.00	1,00	43	156	99,5	99,50
7.00 - 8.00	1,00	156	337	246,5	246,50
8.00 - 9.00	1,00	337	395	366,0	366,00
9.00 - 10.00	1,00	395	828	611,5	611,50
10.00 - 11.00	1,00	828	939	883,5	883,50
11.00 - 12.00	1,00	939	539	739,0	739,00
12.00 - 13.00	1,00	539	329	434,0	434,00
13.00 - 14.00	1,00	329	366	347,5	347,50
14.00 - 15.00	1,00	366	450	408,0	408,00
15.00 - 16.00	1,00	450	159	304,5	304,50
16.00 - 17.00	1,00	159	135	147,0	147,00
ENERGÍA TOTAL (Panel Fijo):					4587,00

Fuente: (Elaboración propia)

Para el caso del perfil de irradiancia del sistema discreto con seguimiento solar

Figura 37. Método del trapecio para el perfil del sistema discreto con seguimiento solar



Fuente: (Elaboración propia)

Los cálculos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14. Resumen de los cálculos de cada trapecio del perfil del sistema discreto con seguimiento solar

Intervalo	Δt (h)	G_1 (W/m ²)	G_2 (W/m ²)	Promedio (W/m ²)	Energía (Wh/m ²)
6.00 - 6.25	0,25	70	100	85,0	21,25
6.25 - 6.50	0,25	100	150	125,0	31,25
6.50 - 6.75	0,25	150	210	180,0	45,00
6.75 - 7.00	0,25	210	270	240,0	60,00
7.00 - 7.25	0,25	270	330	300,0	75,00
7.25 - 7.50	0,25	330	390	360,0	90,00
7.50 - 7.75	0,25	390	450	420,0	105,00
7.75 - 8.00	0,25	450	510	480,0	120,00
8.00 - 8.25	0,25	510	580	545,0	136,25
8.25 - 8.50	0,25	580	650	615,0	153,75
8.50 - 8.75	0,25	650	720	685,0	171,25
8.75 - 9.00	0,25	720	780	750,0	187,50
9.00 - 9.25	0,25	780	830	805,0	201,25
9.25 - 9.50	0,25	830	880	855,0	213,75
9.50 - 9.75	0,25	880	900	890,0	222,50
9.75 - 10.00	0,25	900	910	905,0	226,25
10.00 - 10.25	0,25	910	920	915,0	228,75
10.25 - 10.50	0,25	920	920	920,0	230,00
10.50 - 10.75	0,25	920	915	917,5	229,38
10.75 - 11.00	0,25	915	910	912,5	228,13
11.00 - 11.25	0,25	910	910	910,0	227,50
11.25 - 11.50	0,25	910	905	907,5	226,88
11.50 - 11.75	0,25	905	900	902,5	225,63
11.75 - 12.00	0,25	900	890	895,0	223,75
12.00 - 12.25	0,25	890	870	880,0	220,00
12.25 - 12.50	0,25	870	850	860,0	215,00
12.50 - 12.75	0,25	850	820	835,0	208,75
12.75 - 13.00	0,25	820	790	805,0	201,25
13.00 - 13.25	0,25	790	750	770,0	192,50
13.25 - 13.50	0,25	750	710	730,0	182,50
13.50 - 13.75	0,25	710	660	685,0	171,25
13.75 - 14.00	0,25	660	610	635,0	158,75
14.00 - 14.25	0,25	610	560	585,0	146,25
14.25 - 14.50	0,25	560	500	530,0	132,50
14.50 - 14.75	0,25	500	440	470,0	117,50
14.75 - 15.00	0,25	440	380	410,0	102,50
15.00 - 15.25	0,25	380	320	350,0	87,50
15.25 - 15.50	0,25	320	260	290,0	72,50
15.50 - 15.75	0,25	260	210	235,0	58,75
15.75 - 16.00	0,25	210	170	190,0	47,50
16.00 - 16.25	0,25	170	140	155,0	38,75

16.25 - 16.50	0,25	140	110	125,0	31,25
16.50 - 16.75	0,25	110	90	100,0	25,00
16.75 - 17.00	0,25	90	70	80,0	20,00
ENERGÍA TOTAL (Seguimiento Solar):					6310,00
<i>Fuente: (Elaboración propia)</i>					

El porcentaje del área sombreada se representa de la siguiente manera.

$$\%Produccion = \frac{E_{seguimiento\ solar} - E_{fijo}}{E_{fijo}} \times 100\%$$

$$\%Produccion = \frac{6310 - 4587}{4587} \times 100\%$$

$$\%Produccion \approx 38\%$$

Ambos resultados confirman que el sistema con seguimiento solar presenta una mejora significativa en la captación de energía solar, con valores que oscilan entre el 32% y 38% de incremento respecto al sistema fijo.

CONCLUSIONES

- Se evaluó la eficiencia energética del sistema fotovoltaico fijo de la UNSAAC a partir del análisis de la irradiancia incidente, la temperatura de operación del módulo y el comportamiento térmico del sistema. Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia instantánea del módulo se mantiene en un valor promedio aproximado de 0,17, lo cual es coherente con las especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico utilizado. Esta evaluación permitió establecer una línea base confiable para la comparación posterior con el sistema de seguimiento solar discreto.
- El análisis del sistema discreto de seguimiento solar evidenció que la implementación de este tipo de seguimiento no genera una variación significativa en la eficiencia del módulo fotovoltaico, debido a que esta depende principalmente de las características propias del módulo y de su temperatura de operación. No obstante, el sistema discreto de seguimiento solar incrementa la irradiancia incidente sobre el módulo durante un mayor intervalo del día, lo que permite mantener valores de eficiencia similares al sistema fijo, pero operando bajo un mayor nivel de recurso solar aprovechado.
- La comparación de la energía eléctrica diaria generada entre el sistema fotovoltaico fijo y el sistema discreto de seguimiento solar demostró una diferencia significativa a favor del sistema discreto con seguimiento solar. A partir de la integración temporal de la potencia eléctrica generada, se determinó que el sistema discreto presenta un incremento aproximado del 32% al 38% en la energía diaria producida respecto al sistema fijo. Este aumento se atribuye directamente al mayor nivel de irradiación captada a lo largo del día y no a una mejora en la eficiencia intrínseca del módulo fotovoltaico.

- La implementación de un sistema discreto de seguimiento solar en los sistemas fotovoltaicos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) genera una mejora significativa en el rendimiento energético del sistema, evidenciada principalmente en el incremento de la energía eléctrica diaria producida. A partir del modelado y análisis energético desarrollado, se determinó que el seguimiento solar discreto permite un mejor aprovechamiento del recurso solar a lo largo del día, en comparación con un sistema fotovoltaico fijo convencional, aun cuando la eficiencia intrínseca del módulo fotovoltaico se mantiene aproximadamente constante en ambos sistemas.

SUGERENCIAS

- Se sugiere que futuras investigaciones empleen perfiles de irradiancia solar correspondientes a diferentes fechas y años, preferentemente con datos actualizados y representativos de distintas épocas del año. Esto permitiría evaluar el comportamiento energético de los sistemas fotovoltaicos bajo diversas condiciones estacionales y mejorar la representatividad de los resultados obtenidos.
- Se sugiere que futuros trabajos consideren el uso de equipos fotovoltaicos cuyas hojas técnicas proporcionen información completa sobre sus parámetros eléctricos y componentes internos que permitiría desarrollar modelos más precisos y representativos del comportamiento real del sistema.
- Se sugiere realizar pruebas experimentales que permitan contrastar los resultados obtenidos mediante simulación con datos reales de operación. La validación experimental del sistema discreto de seguimiento solar fortalecería la confiabilidad de los resultados y permitiría evaluar la aplicabilidad práctica del modelo propuesto en instalaciones reales de la UNSAAC.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdulwaheed Musa, E. A. (02 de 02 de 2023). *MDPI*. Obtenido de MDPI:
https://www.mdpi.com/2078-2489/14/4/211?type=check_update&version=1
- Aguilera, F. (2019). *Análisis de la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos bajo distintas condiciones climáticas. Revista de Energía Renovable*, 14(2), 45-60.
- Aleman, M. C. (21 de 02 de 2024). *BLOGSUDIMA*. Obtenido de BLOGSUDIMA:
<https://blogs.udima.es/ingenieria-industrial/irradiancia-irradiacion-y-radiacion-solar/>
- Alonso, J. A. (18 de 11 de 2024). *SUNFIELDS*. Obtenido de SUNFIEDLS: https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/?srsltid=AfmBOopOJXyIhudFvpsHJXIIrBI7t0uPqk8l0G4_GOnI3Nc9Avkv5hyD
- Alonso, J. A. (2 de 05 de 2025). *SUNFIELDS*. Obtenido de Parámetros de paneles solares fotovoltaicos: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/parametros/?srsltid=AfmBOoqYHtjQeTc6ghJaz1n0LuImdMmATQ5p6YuSQHpWQWaMujIfRPsx>
- Attia, A. (2022). *MATLAB for Engineers and Scientists*. Academic Press.
- Camarena, M. (2021). *Efecto de la temperatura y radiación en el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos. Journal of Solar Energy*, 18(1), 27-39.
- Chang, T. P. (2010). The gain of single-axis tracked panels as a function of tracking step and time interval. En *Applied Energy* (págs. 86(7–8), 1074–1079).

Delgado, P. &. (2022). *Eficiencia energética en sistemas solares fotovoltaicos fijos: análisis de desempeño en clima tropical*. *Revista de Energías Renovables*, 9(2), 45-58. Obtenido de Eficiencia energética en sistemas solares fotovoltaicos fijos: análisis de desempeño en clima tropical. *Revista de Energías Renovables*, 9(2), 45-58.:
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/energiarenovable/article/view/1220>

Duffie, J. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.

Eléctrica, G. d.-D. (2021). *Instalación de sistemas fotovoltaicos en el Departamento del Cusco*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas de Perú.

ERCO. (30 de 12 de 2024). *ERCO*. Obtenido de ERCO:

<https://erco.energy/pa/blog/componentes-sistema-solar-fotovoltaico>

Franco, J. &. (2015). *Diseño y evaluación de un seguidor solar automático para mejorar el rendimiento en las instalaciones fotovoltaicas*. Cusco-Perú: UNSAAC.

García, L. &. (2020). *Comparación de sistemas fotovoltaicos con y sin seguimiento solar: Un análisis de eficiencia energética*. *Energía y Sociedad*, 23(4), 71-84.

García, R. L. (2021). *Fundamentos de sistemas solares fotovoltaicos: diseño y componentes esenciales*. Universitaria UPM.

Green, M. A. (2008). *Third generation photovoltaics: Advanced solar energy conversion*. Springer.

Hegedus, S. &. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.

Hernández, L. &. (2022). *Evaluación comparativa entre sistemas fotovoltaicos fijos y con seguimiento solar discreto en zonas andinas*. *Revista Colombiana de Tecnologías*

- Limpias*. Obtenido de Evaluación comparativa entre sistemas fotovoltaicos fijos y con seguimiento solar discreto en zonas andinas. Revista Colombiana de Tecnologías Limpias: <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/2134>
- Jiménez, J. &. (2018). *Curvas I-V y la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos*. *Energía y Tecnología*, 19(3), 89-102.
- Layme, J. A. (2017). *Diseño e implementación de un seguidor solar para optimizar la captación de radiación solar de un módulo fotovoltaico*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- López, A. P. (2021). *Diseño de sistemas fotovoltaicos: Aspectos técnicos y económicos*. *Editorial Científica*, 3(1), 15-30.
- López, J. A. (2018). *Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de dos ejes y un sistema fijo*. *CIBA*, 7(13). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6671247.pdf>
- López-Vargas, J. M. (2020). *Diseño y optimización de un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica discreta para aplicaciones rurales*. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 25-38. Obtenido de Diseño y optimización de un sistema de seguimiento solar de dos ejes con lógica discreta para aplicaciones rurales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 25-38.: <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/3918>
- Markvart, T. &. (2003). *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. Elsevier.
- Martínez, M. (2022). *Sistemas de seguimiento solar discretos: Análisis y aplicación en plantas fotovoltaicas*. *Revista de Energías Renovables*, 25(2), 110-123.

MathWorks. (s.f.). *Modeling Solar Panels in Simscape Electrical*. Obtenido de The MathWorks:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/solar-cell.html>

Moreno, L. P. (2019). *Introducción a la energía solar fotovoltaica*. Revista de Energía y Sociedad, 7(1), 11-26.

Muñoz, J. &. (2020). *Diseño y simulación de un sistema fotovoltaico fijo en zonas rurales*. Revista Ingeniería y Región, 18(2), 66-79. Obtenido de Diseño y simulación de un sistema fotovoltaico fijo en zonas rurales. Revista Ingeniería y Región, 18(2), 66-79.:
<https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/ingenieriayregion/article/view/3541>

Pérez, R. e. (1990). *Modeling solar radiation on inclined surfaces*. Solar Energy.

Perpiñán Lamigueiro, Ó. (. (s.f.). *Energía solar fotovoltaica*. Obtenido de Manual técnico:
<https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>

Perú., E. (2019). *Informe sobre instalaciones fotovoltaicas rurales*. Obtenido de Ergon Perú.:
<http://www.ergonperu.com>

Rodríguez-Gallegos, C. D. (2018). *Impacto del seguimiento solar discreto en la eficiencia energética de sistemas fotovoltaicos*. Energía y Futuro, 15(3), 101-110. Obtenido de Impacto del seguimiento solar discreto en la eficiencia energética de sistemas fotovoltaicos. Energía y Futuro, 15(3), 101-110:
<https://www.energíayfuturo.org/revista15/discreto.pdf>

SCHWARTZ. (03 de 06 de 2018). *LBA INDUSTRIAL*. Obtenido de LBA INDUSTRIAL:
<https://www.lbaindustrial.com.mx/seguidor-solar/?cn-reloaded=1>

Solano, V. M. (2021). *Comparativa técnica y económica entre sistemas fotovoltaicos fijos y de seguimiento solar en clima ecuatorial. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 31(1), 77-93.* . Obtenido de Comparativa técnica y económica entre sistemas fotovoltaicos fijos y de seguimiento solar en clima ecuatorial. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 31(1), 77-93. :
<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/4667>

Toranzo, J. N. (2015). *Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar.*
Obtenido de Ingeniería Energética: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329138826008.pdf>

Zanabria, E. (2012). *X Peruano de Energia Solar Simposio.* Cusco: UNSAAC.

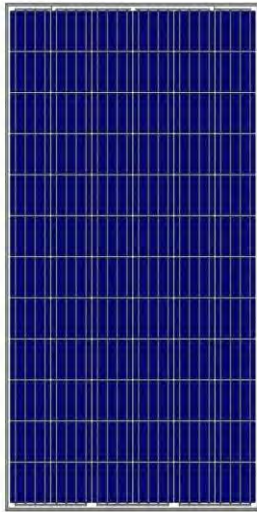
ANEXOS

Hoja técnica de los módulos solares



AS-6P

POLYCRYSTALLINE MODULE



Passionately
committed to
delivering innovative
energy solution

ADVANCED PERFORMANCE & PROVEN ADVANTAGES

- High module conversion efficiency up to 17.52% by using high efficient solar cells and advanced manufacturing technology.
- Low degradation and excellent performance under high temperature and low light conditions.
- Robust aluminum frame ensures the modules to withstand wind loads up to 2400Pa and snow loads up to 5400Pa.
- High reliability against extreme environmental conditions (passing salt mist, ammonia and hail tests).
- Potential induced degradation (PID) resistance.
- Positive power tolerance of 0 ~ +3 %.

CERTIFICATIONS

- IEC61215, IEC61730, IEC62716, IEC61701, CE, CQC, CGC, ETL(USA), JET(Japan), J-PEC(Japan), Kemco(South Korea), KS(South Korea), MCS(UK), CEC(Australia), FSEC(FL-USA), CSI Eligible(CA-USA), Israel Electric(Israel), InMetro(Brazil), TSE(Turkey)
- ISO9001:2008: Quality management system
- ISO14001:2004: Environmental management system
- OHSAS18001:2007: Occupational health and safety management system

SPECIAL WARRANTY

- 12 years limited product warranty.
- Limited linear power warranty: 12 years 91.2% of the nominal power output, 30 years 80.6% of the nominal power output.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC

Nominal Power (P_{max})	300W	305W	310W	315W	320W	325W	330W	335W	340W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	45.3V	45.4V	45.5V	45.6V	45.7V	45.8V	45.9V	46.0V	46.1V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.68A	8.76A	8.85A	8.93A	9.04A	9.15A	9.26A	9.38A	9.50A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	36.7V	36.8V	36.9V	37.0V	37.1V	37.2V	37.3V	37.4V	37.5V
Current at Nominal Power (I_{mp})	8.18A	8.29A	8.41A	8.52A	8.63A	8.74A	8.85A	8.96A	9.07A
Module Efficiency (%)	15.46	15.72	15.98	16.23	16.49	16.75	17.01	17.26	17.52
Operating Temperature	-40°C to +85°C								
Maximum System Voltage	1000V DC								
Fire Resistance Rating	Type 1(in accordance with UL1703)/Class C(IEC61730)								
Maximum Series Fuse Rating	15A								

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT

Nominal Power (P_{max})	221W	224W	228W	232W	236W	239W	243W	247W	251W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	41.7V	41.8V	41.9V	42.0V	42.1V	42.2V	42.3V	42.4V	42.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	7.03A	7.10A	7.17A	7.23A	7.32A	7.41A	7.50A	7.60A	7.70A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	33.4V	33.5V	33.6V	33.7V	33.8V	33.9V	34.0V	34.1V	34.2V
Current at Nominal Power (I_{mp})	6.62A	6.69A	6.79A	6.89A	6.98A	7.05A	7.15A	7.25A	7.34A

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Polycrystalline 156x156mm (6x6inches)
Number of cells	72 (6x12)
Module dimensions	1956x992x50mm (77.01x39.06x1.97inches)
Weight	23kg (50.7lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 1000mm (39.37inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

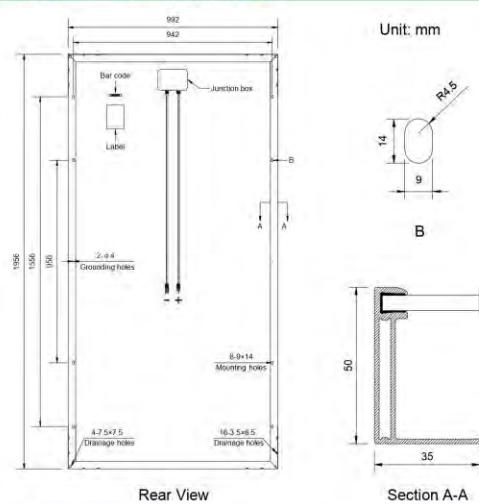
TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.41%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.31%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.05%/°C

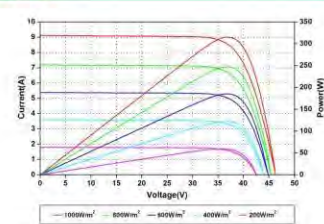
PACKAGING

Standard packaging	21pcs/pallet
Module quantity per 20' container	210pcs
Module quantity per 40' container	462pcs(GP)/506pcs(HQ)

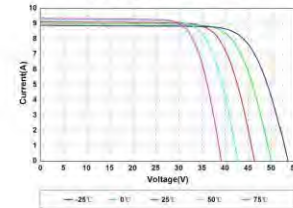
ENGINEERING DRAWINGS



IV CURVES



Current-Voltage and Power-Voltage Curves at Different Irradiances



Current-Voltage Curves at Different Temperatures

Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

Amerisolar and Amerisolar logo denoted with © are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.

Hoja técnica del inversor del sistema fotovoltaico

SUNNY TRIPOWER
15000TL / 20000TL / 25000TL



Intelligent service with
SMA Smart Connected

SMA ShadeFix
STRING LEVEL OPTIMIZATION

Efficient	Safe	Flexible	Innovative
• Maximum efficiency of 98.4% • Yield increase without installation effort due to integrated shade management SMA ShadeFix	• DC surge arrester (SPD type II) can be integrated	• DC input voltage of up to 1000 V • Multistring capability for optimum system design • Optional display	• Cutting-edge grid management functions with Integrated Plant Control • Reactive power available 24/7 (Q on Demand 24/7)

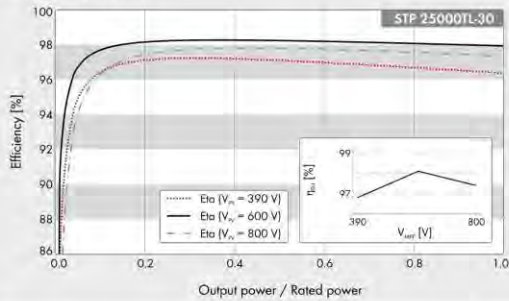
SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL

The versatile specialist for large-scale commercial plants and solar power plants

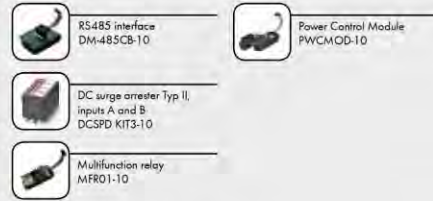
The Sunny Tripower is the ideal inverter for large-scale commercial and industrial plants. Not only does it deliver extraordinary high yields with an efficiency of 98.4%, but it also offers enormous design flexibility and compatibility with many PV modules thanks to its multistring capabilities and wide input voltage range.

The future is now: the Sunny Tripower comes with cutting-edge grid management functions such as Integrated Plant Control, which allows the inverter to regulate reactive power at the point of common coupling. Separate controllers are no longer needed, lowering system costs. Another new feature—reactive power provision on demand (Q on Demand 24/7).

Efficiency Curve



Accessory



● Standard features ○ Optional features — Not available
Data at nominal conditions
Status: 02/2021

Technical Data

Input (DC)

Max. generator power	27000 Wp
DC rated power	15330 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	240 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A
Max. DC short-circuit current input A / input B	43 A / 43 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A;3; B;3

Output (AC)

Rated power (at 230 V, 50 Hz)	15000 W
Max. AC apparent power	15000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE, 220 V / 380 V 3 / N / PE, 230 V / 400 V 3 / N / PE, 240 V / 415 V

AC voltage range	180 V to 280 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz

Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / Rated output current	29 A / 21.7 A
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0 overexcited to 0 underexcited
THD	≤ 3%
Feed-in phases / connection phases	3 / 3

Efficiency

Max. efficiency / European Efficiency	98.4% / 98.0%
---------------------------------------	---------------

Protective devices

DC-side disconnection device	●
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●
DC surge arrester (Type II) can be integrated	○
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / —
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	●
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	I / AC, III; DC: II

General data

Dimensions (W / H / D)	661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)
Weight	61 kg (134.48 lb)
Operating temperature range	−25 °C to +60 °C (−13 °F to +140 °F)
Noise emission (typical)	51 dB(A)
Self-consumption (at night)	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / Opticool
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%

Features / function / Accessories

DC connection / AC connection	SUNCLIX / spring-cage terminal
Display	○
Interface: RS485, Speedwire/Webconnect	○ / ●
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus	● / ●
Multifunction relay / Power Control Module	○ / ○
Shade management SMA ShadeFix / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7	● / ● / ●
Off-Grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible	● / ●
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years	● / ○ / ○ / ○
Certificates and permits (more available on request)	

* Does not apply to all national appendices of EN 50438

Type designation

Sunny Tripower 15000TL	Sunny Tripower 20000TL	Sunny Tripower 25000TL
27000 Wp	36000 Wp	45000 Wp
15330 W	20440 W	25550 W
1000 V	1000 V	1000 V
240 V to 800 V / 600 V	320 V to 800 V / 600 V	390 V to 800 V / 600 V
150 V / 188 V	150 V / 188 V	150 V / 188 V
33 A / 33 A	33 A / 33 A	33 A / 33 A
43 A / 43 A	43 A / 43 A	43 A / 43 A
2 / A;3; B;3	2 / A;3; B;3	2 / A;3; B;3
15000 W	20000 W	25000 W
15000 VA	20000 VA	25000 VA
	3 / N / PE, 220 V / 380 V 3 / N / PE, 230 V / 400 V 3 / N / PE, 240 V / 415 V	
	180 V to 280 V	
	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz	
	50 Hz / 230 V	
29 A / 21.7 A	29 A / 29 A	36.2 A / 36.2 A
	1 / 0 overexcited to 0 underexcited	
	≤ 3%	
	3 / 3	
98.4% / 98.0%	98.4% / 98.0%	98.3% / 98.1%
	●	
	● / ●	
	○	
	● / ● / —	
	●	
	I / AC, III; DC: II	
	661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)	
	61 kg (134.48 lb)	
	−25 °C to +60 °C (−13 °F to +140 °F)	
	51 dB(A)	
	1 W	
	Transformerless / Opticool	
	IP65	
	4K4H	
	100%	
	SUNCLIX / spring-cage terminal	
	○	
	○ / ●	
	● / ●	
	○ / ○	
	● / ● / ●	
	● / ●	
	● / ○ / ○ / ○	
	AS 4777, BDEW 2008, C10/11, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, CNS 15382, CNS 15426, DEWA 2.0, DK1, DK2, EN 50549-1, EN 50549-2, G99/1, EN 50438:2013*, IEC 60068-2-xx, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, IS 16221-1/2, IS 16169, MEA 2013, NBR 16149, NEN EN 50438, NRS 097-2-1, PEA 2013, NTS, PPC, RD 1699/413, RD 661/2007, Res. n° 7/2013, RIG compliant, SI4777, TOR generator, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE ARN 4105, VDE ARN 4110, VDE 2014	
STP 15000TL-30	STP 20000TL-30	STP 25000TL-30

Script del cálculo de cantidad de energía diaria

```

clear; clc; close all;
%% =====
% PARAMETROS DEL MODULO FV
% =====
eta_STC = 0.17;           % Eficiencia nominal [-]
beta    = 0.004;          % Coeficiente térmico [1/°C]
Tamb    = 15;             % Temperatura ambiente en Cusco [°C]
NOCT    = 45;             % Temperatura NOCT [°C]
A       = 87.3;           % Área del campo FV [m^2]

%% SISTEMA A (horario)
t_A = (6:17)';
dt_A = 1;
G_A = [43 156 337 395 828 939 539 329 366 450 159 135]';

Tc_A = Tamb + (G_A/800).*(NOCT - 20);
eta_A = eta_STC .* (1 - beta .* (Tc_A - 25));
P_A = eta_A .* G_A*A;           % [W]
E_A = P_A * dt_A;               % [Wh]

Tabla_A = table(t_A, G_A, Tc_A, eta_A, P_A, E_A, ...
    'VariableNames',{'Hora','Irradiancia_W_m2','Temp_Mod_C',...
    'Eficiencia','Potencia_W','Energia_Wh'});

%% SISTEMA B (15 min)
t_B = (6:0.25:17)';
dt_B = 0.25;
G_B = [70 100 150 210 270 330 390 450 510 ...
    580 650 720 780 830 880 900 910 920 ...
    920 915 910 910 905 900 890 870 850 ...
    820 790 750 710 660 610 560 500 440 ...
    380 320 260 210 170 140 110 90 70]';

Tc_B = Tamb + (G_B/800).*(NOCT - 20);
eta_B = eta_STC .* (1 - beta .* (Tc_B - 25));
P_B = eta_B .* G_B*A;           % [W]
E_B = P_B * dt_B;               % [Wh]

Tabla_B = table(t_B, G_B, Tc_B, eta_B, P_B, E_B, ...
    'VariableNames',{'Hora','Irradiancia_W_m2','Temp_Mod_C',...
    'Eficiencia','Potencia_W','Energia_Wh'});

%% RESUMEN DIARIO
Resumen = table( ...
    sum(G_A)*dt_A/1000, sum(E_A)/1000, ...
    sum(G_B)*dt_B/1000, sum(E_B)/1000, ...
    'VariableNames',{'Irradiacion_A_kWh_m2','Energia_A_kWh',...
    'Irradiacion_B_kWh_m2','Energia_B_kWh'});

%% MOSTRAR RESULTADOS
fprintf('\n===== TABLA SISTEMA FIJO =====\n');

```

```

fprintf('%-6s %-15s %-12s %-12s %-12s %-12s\n', ...
    'Hora', 'Irrad(W/m2)', 'Tc(C)', 'Eficiencia', 'Potencia(W)', 'Energia(Wh)');
fprintf('%s\n', repmat('-',1,72));
for i = 1:height(Tabla_A)
    fprintf('%-6d %-15.2f %-12.2f %-12.5f %-12.2f %-12.2f\n', ...
        Tabla_A.Hora(i), Tabla_A.Irradiancia_W_m2(i), Tabla_A.Temp_Mod_C(i), ...
        Tabla_A.Eficiencia(i), Tabla_A.Potencia_W(i), Tabla_A.Energia_Wh(i));
end
fprintf('%-6s %-15s %-12s %-12s %-12s %-12.2f\n', ...
    'TOTAL', '---', '---', '---', '---', sum(Tabla_A.Energia_Wh));

fprintf('\n===== TABLA SISTEMA DE SEGUIMIENTO =====\n');
fprintf('%-8s %-15s %-12s %-12s %-12s %-12s\n', ...
    'Hora', 'Irrad(W/m2)', 'Tc(C)', 'Eficiencia', 'Potencia(W)', 'Energia(Wh)');
fprintf('%s\n', repmat('-',1,74));
for i = 1:height(Tabla_B)
    fprintf('%-8.2f %-15.2f %-12.2f %-12.5f %-12.2f %-12.2f\n', ...
        Tabla_B.Hora(i), Tabla_B.Irradiancia_W_m2(i), Tabla_B.Temp_Mod_C(i), ...
        Tabla_B.Eficiencia(i), Tabla_B.Potencia_W(i), Tabla_B.Energia_Wh(i));
end
fprintf('%-8s %-15s %-12s %-12s %-12s %-12.2f\n', ...
    'TOTAL', '---', '---', '---', '---', sum(Tabla_B.Energia_Wh));

fprintf('\n===== RESUMEN DIARIO =====\n');
fprintf('Irradiacion SISTEMA FIJO : %.4f kWh/m2\n', Resumen.Irradiacion_A_kWh_m2);
fprintf('Energia SISTEMA FIJO      : %.4f kWh\n',      Resumen.Energia_A_kWh);
fprintf('Irradiacion SISTEMA DE SEGUIMIENTO : %.4f kWh/m2\n',
Resumen.Irradiacion_B_kWh_m2);
fprintf('Energia SISTEMA DE SEGUIMIENTO      : %.4f kWh\n',
Resumen.Energia_B_kWh);

```


Script de conexión del modelo PVArray

```
% System frequency (Hz):
Fnom=60;
% Specialized Power Systems sample time (s):
Ts_Power=1/(33*Fnom)/100;
% Inverter Control system sample time (s):
Ts_Control=10*Ts_Power;

% *****
%                               POWER PARAMETERS
% *****

Pnom = 250e3;      % Inverter nominal 3-phase power (VA)
Vnom_prim = 25e3;  % Nominal inverter primary line-to-line voltage(Vrms)
Vnom_dc = 480;     % Nominal DC link voltage (V)

% Nominal inverter secondary line-to-line voltage (Vrms):
Vnom_sec= 0.85*Vnom_dc/2/sqrt(2)*sqrt(3);

% Transformer parameters:
% Nominal voltage in Vrms, Resistance in pu and Leakage inductance in pu

Pnom_xfo=Pnom;      % Transformer nominal power (VA)
TotalLeakage=0.06;  % Transformer total leakage (pu)

W1_xfo= [Vnom_prim TotalLeakage/25/2 TotalLeakage/2]; % Winding 1 (Grid side)
W2_xfo= [Vnom_sec TotalLeakage/25/2 TotalLeakage/2]; % Winding 2 (DC link side)

Rm_xfo=200; % Magnetization resistance (pu)
Lm_xfo=200; % Magnetization inductance (pu)

% Inverter choke RL [Rpu Lpu]
RLchoke=[ 0.15/100 0.15 ]; % in pu
Pbase_sec=Vnom_sec^2/Pnom;
RL(1)=RLchoke(1)*Pbase_sec;
RL(2)=RLchoke(2)*Pbase_sec/(2*pi*Fnom);

% Filter C Parameters
Qc=0.1*Pnom; % Capacitive reactive power (var)
Pc=Qc/50; % Active power (W)

% DC link energy for 3/4 cycle of Pnom
Ceq= 3/4 * (Pnom/Fnom*2/Vnom_dc^2);
Clink=Ceq*2; % Cp & Cn (F)

% IGBT Bridge parameters

Rs=1e6; % IGBT Snubber (Ohm)
Cs=inf; % IGBT snubber (F)
Ron=1e-3; % IGBT conduction resistance
Vf=0; % IGBT Forward voltage
Vfd=0; % Diode Forward voltage
```

```

% *****
%                               CONTROL PARAMETERS
% *****

% MPPT Control (Perturb & Observe Algorithm)

Increment_MPPT= 0.01;      % Increment value used to increase/decrease Vdc_ref
Limits_MPPT= [ 583 357 ]; % Upper & Lower limit for Vdc_ref (V)

% VDC regulator (VDCreg)

Kp_VDCreg=2;              % Proportional gain
Ki_VDCreg= 400;           % Integral gain
LimitU_VDCreg= 1.5;       % Output (Idref) Upper limit (pu)
LimitL_VDCreg= -1.5;      % Output (Idref) Lower limit (pu)
%
% Current regulator (Ireg)

RLff(1)= W1_xfo(2) + W2_xfo(2) + RLchoke(1); % Feedforward values
RLff(2)= W1_xfo(3) + W2_xfo(3) + RLchoke(2); % Feedforward values

Kp_Ireg= 0.3;             % Proportional gain
Ki_Ireg= 20;              % Integral gain
LimitU_Ireg= 1.5;         % Output (Vdq_conv) Upper limit (pu)
LimitL_Ireg= -1.5;        % Output (Vdq_conv) Lower limit (pu)

% PWM Modulator Parameters

Fc= 33 * Fnom ; % Carrier frequency (Hz)

```