

INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO UNIVERSITARIO RUMIÑAHUI

ESCUELA DE POSGRADOS

**MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN SOLAR Y
EÓLICA**

**Trabajo de Titulación Previo a la Obtención del Título de Magister Tecnológico en
Sistemas de Generación Solar y Eólica.**

Tema:

**Evaluación de los parámetros técnicos y eficiencia de conversión energética de paneles
fotovoltaico flexibles de película fina en superficies no convencionales.**

Autor: Santiago Rogelio Pérez Mora

Director: Luis Daniel Andagoya Alba

Fecha: Septiembre de 2024

Sangolquí - Ecuador



Autor: Pérez Mora Santiago Rogelio

Título a obtener: Magister Tecnológico en Sistemas de Generación Solar y Eólica

Matriz: Sangolquí -Ecuador

Correo electrónico: santiago.perez@ister.edu.ec



Dirigido por: Andagoya Alba Luis Daniel

Título: Master en Integración de las Energías Renovables en el Sistema Eléctrico / Ingeniero Eléctrico.

Matriz: Sangolquí -Ecuador

Correo electrónico: luis.andagoya@ister.edu.ec

Todos los derechos reservados

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

@2024 Tecnológico Universitario Rumiñahui

Sangolquí – Ecuador

PÉREZ MORA SANTIAGO ROGELIO

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO TITULACIÓN

Sangolquí, 15 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Titulación denominado: **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE PANELES SOLARES FLEXIBLES DE PELÍCULA FINA EN SUPERFICIES NO CONVENCIONALES** realizado por **SANTIAGO ROGELIO PÉREZ MORA** ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la institución, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

LUIS DANIEL
ANDAGOYA
ALBA

Firmado digitalmente
por LUIS DANIEL
ANDAGOYA ALBA
Fecha: 2024.09.15
21:24:58 -05'00'

Luis Daniel Andagoya-Alba
Director del Trabajo de Titulación
C.I.:1723285993
Correo electrónico: luis.andagoya@ister.edu.ec

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Sangolquí, 09 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

Por medio de la presente, yo, Santiago Rogelio Pérez Mora, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: ser autor del trabajo de titulación denominado "Evaluación De Los Parámetros Técnicos Y Eficiencia De Conversión Energética De Paneles Solares Flexibles De Película Fina En Superficies No Convencionales, de la Maestría Tecnológica en Sistemas de Generación Solar y Eólica; manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

Esta cesión se otorga de manera no exclusiva y por un periodo indeterminado. Sin embargo, conservo los derechos morales sobre mi obra.

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**SANTIAGO ROGELIO
PEREZ MORA**

Santiago Rogelio Pérez Mora

CI: 1717411555

**FORMULARIO PARA ENTREGA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
EN BIBLIOTECA DEL INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO
UNIVERSITARIO RUMIÑAHUI**

MAESTRÍA TECNOLÓGICA: Maestría en Sistemas de Generación Solar y Eólica

AUTOR /ES:

Santiago Rogelio Pérez Mora

TUTOR:

Luis Daniel Andagoya Alba

CONTACTO ESTUDIANTE:

0984317232

CORREO ELECTRÓNICO:

santiago.perez@ister.edu.ec

TEMA:

Evaluación de los parámetros técnicos y eficiencia de conversión energética de Paneles Solares Flexibles de Película Fina en Superficies No Convencionales.

RESUMEN EN ESPAÑOL:

Los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina ofrecen una solución innovadora para la instalación en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas, donde los paneles tradicionales presentan limitaciones. Este estudio evalúa los parámetros técnicos y la eficiencia de conversión energética de paneles fotovoltaicos flexibles de película fina instalados en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas. La investigación se centra en analizar variables clave como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), potencia de salida, eficiencia de conversión energética (η) y factor de campo (FF) bajo diversas condiciones ambientales. A través de un enfoque cuantitativo y correlacional, se midieron estos parámetros en diferentes configuraciones estructurales y se analizó el impacto de factores ambientales como la radiación solar, la temperatura y la humedad en el rendimiento de los paneles.

Los resultados indican que los paneles fotovoltaicos flexibles presentan un comportamiento energético comparable o superior a los paneles rígidos tradicionales en superficies no convencionales cuando se optimizan las condiciones de instalación. Además, se observa que la eficiencia de conversión energética está directamente influenciada por la geometría de la

superficie de instalación y las condiciones climáticas, especialmente en entornos urbanos densos. Este estudio proporciona datos empíricos valiosos que contribuyen a la mejora del diseño y la optimización de sistemas fotovoltaicos flexibles, facilitando su integración en infraestructuras arquitectónicas complejas y promoviendo el uso de tecnologías solares más eficientes y sostenibles.

PALABRAS CLAVE:

Paneles fotovoltaicos flexibles, película fina, eficiencia de conversión, superficies no convencionales, energía solar, condiciones ambientales.

ABSTRACT:

Thin-film flexible photovoltaic panels offer an innovative solution for installation on unconventional surfaces, such as curved roofs and cylindrical structures, where traditional panels face limitations. This study evaluates the technical parameters and energy conversion efficiency of thin-film flexible photovoltaic panels installed on unconventional surfaces, such as curved roofs and cylindrical structures. The research focuses on analyzing key variables such as open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), output power, energy conversion efficiency (η), and fill factor (FF) under various environmental conditions. Through a quantitative and correlational approach, these parameters were measured across different structural configurations, and the impact of environmental factors, including solar radiation, temperature, and humidity, on the panels' performance was analyzed.

The results indicate that flexible photovoltaic panels exhibit energy performance comparable to or exceeding that of traditional rigid panels when installed on unconventional surfaces, provided installation conditions are optimized. Additionally, it was observed that energy conversion efficiency is directly influenced by the geometry of the installation surface and climatic conditions, particularly in dense urban environments. This study provides valuable empirical data that contributes to the improvement of the design and optimization of flexible photovoltaic systems, facilitating their integration into complex architectural infrastructures and promoting the use of more efficient and sustainable solar technologies.

KEYWORDS:

Flexible photovoltaic panels, thin-film, conversion efficiency, unconventional surfaces, solar energy, environmental conditions.

SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Sangolquí, 16 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

A través del presente me permito aceptar la publicación del trabajo de titulación denominado: **“Evaluación de los parámetros técnicos y eficiencia de conversión energética de Paneles Fotovoltaico Flexibles de Película Fina en Superficies No Convencionales.”** de la Unidad de Integración Curricular en el repositorio digital “DsPace” del estudiante: **Santiago Rogelio Pérez Mora**, con documento de identificación No1717411555, estudiante de la Maestría Tecnológica en Sistemas de Generación Solar y Eólica.

El trabajo ha sido revisado las similitudes en el software “TURNITING” y cuenta con un porcentaje máximo de 15%; motivo por el cual, el Trabajo de titulación es publicable.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO ROGELIO
PEREZ MORA

Santiago Rogelio Pérez Mora
CI: 1717411555

Dedicatoria:

Este trabajo está dedicado con amor y gratitud a mis padres, quienes han sido mi fuente eterna de apoyo y motivación académico. Mi esposa por mi crecimiento personal y profesional.

Agradecimiento:

A mi familia, gracias por su amor, paciencia y constante aliento.

Resumen:

Los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina ofrecen una solución innovadora para la instalación en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas, donde los paneles tradicionales presentan limitaciones. Este estudio evalúa los parámetros técnicos y la eficiencia de conversión energética de paneles fotovoltaicos flexibles de película fina instalados en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas. La investigación se centra en analizar variables clave como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), potencia de salida, eficiencia de conversión energética (η) y factor de llenado (FF) bajo diversas condiciones ambientales. A través de un enfoque cuantitativo y correlacional, se midieron estos parámetros en diferentes configuraciones estructurales y se analizó el impacto de factores ambientales como la radiación solar, la temperatura y la humedad en el rendimiento de los paneles.

Los resultados indican que los paneles fotovoltaicos flexibles presentan un comportamiento energético comparable o superior a los paneles rígidos tradicionales en superficies no convencionales cuando se optimizan las condiciones de instalación. Además, se observa que la eficiencia de conversión energética está directamente influenciada por la geometría de la superficie de instalación y las condiciones climáticas, especialmente en entornos urbanos densos. Este estudio proporciona datos empíricos valiosos que contribuyen a la mejora del diseño y la optimización de sistemas fotovoltaicos flexibles, facilitando su integración en infraestructuras arquitectónicas complejas y promoviendo el uso de tecnologías solares más eficientes y sostenibles.

Palabras claves: paneles fotovoltaicos flexibles, película fina, eficiencia de conversión, superficies no convencionales, energía solar, condiciones ambientales.

Abstract:

Thin-film flexible photovoltaic panels offer an innovative solution for installation on unconventional surfaces, such as curved roofs and cylindrical structures, where traditional panels face limitations. This study evaluates the technical parameters and energy conversion efficiency of thin-film flexible photovoltaic panels installed on unconventional surfaces, such as curved roofs and cylindrical structures. The research focuses on analyzing key variables such as open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), output power, energy conversion efficiency (η), and fill factor (FF) under various environmental conditions. Through a quantitative and correlational approach, these parameters were measured across different structural configurations, and the impact of environmental factors, including solar radiation, temperature, and humidity, on the panels' performance was analyzed.

The results indicate that flexible photovoltaic panels exhibit energy performance comparable to or exceeding that of traditional rigid panels when installed on unconventional surfaces, provided installation conditions are optimized. Additionally, it was observed that energy conversion efficiency is directly influenced by the geometry of the installation surface and climatic conditions, particularly in dense urban environments. This study provides valuable empirical data that contributes to the improvement of the design and optimization of flexible photovoltaic systems, facilitating their integration into complex architectural infrastructures and promoting the use of more efficient and sustainable solar technologies.

Keywords: flexible photovoltaic panels, thin-film, conversion efficiency, unconventional surfaces, solar energy, environmental conditions.

INDICE

Aprobación del Director del Trabajo de Titulación.....	III
Formulario para Entrega del Trabajo de Titulación en Biblioteca del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui.....	V
Solicitud de Publicación del Trabajo de Titulación.....	VII
INTRODUCCIÓN	1
TEMA	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
PROBLEMA CIENTÍFICO	1
PREGUNTAS CIENTÍFICAS O DIRECTRICES	2
OBJETIVO GENERAL	2
<i>Objetivos específicos</i>	2
JUSTIFICACIÓN	3
<i>Variables Independientes</i>	4
<i>Tipo de Superficie de Instalación:</i>	4
<i>Condiciones Ambientales:</i>	4
<i>Configuración del Panel Solar:</i>	4
<i>Variables Dependientes</i>	4
<i>Rendimiento Energético del Panel:</i>	4
<i>Eficiencia de Conversión Energética:</i>	4
<i>Variables Constantes</i>	5
<i>Tipo de Material del Panel Solar:</i>	5
IDEA A DEFENDER Y/O HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO I.....	6
MARCO TEÓRICO	6
1.1. INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR Y SU RELEVANCIA ACTUAL	6
1.1.1. <i>Impacto en Ecuador</i>	7
1.1.2. <i>Problemática en la Localidad: Superficies no Convencionales</i>	7
1.2. ESTADO DEL ARTE	8
1.3. TEÓRICO – CONCEPTUAL	9
1.3.1. <i>Principios de funcionamiento de los paneles fotovoltaico</i>	9

1.3.2. Tecnología de Paneles Fotovoltaico.....	10
1.3.3. Paneles Fotovoltaico Flexibles de Película Fina	12
1.3.4. Procesos de fabricación y tecnología de deposición de película fina.	14
1.3.5. Ventajas y limitaciones de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina.....	15
1.3.6. Aplicaciones en superficies no convencionales	15
1.3.7. Parámetros Técnicos de Rendimiento	18
1.3.8. Impacto de Condiciones Ambientales en el Rendimiento	22
1.3.9. Comparación entre el rendimiento en entornos urbanos y rurales.	23
1.3.10. Normativas y Estándares Técnicos	24
CAPÍTULO II	25
MARCO METODOLÓGICO	25
2.1. ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
2.2. POBLACIÓN, UNIDADES DE ESTUDIO Y MUESTRA Y/O UNIDAD DE ANÁLISIS.....	25
2.3. MÉTODOS EMPÍRICOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	25
2.4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS Y TÉCNICAS	26
2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	27
2.5.1. Variables dependientes:.....	27
2.5.2. Variables independientes:.....	27
CAPÍTULO III.....	28
PROPUESTA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO.....	28
3.1. FUNDAMENTOS DE LA PROPUESTA	28
3.2. PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA	28
3.3. SELECCIÓN DE SITIO	28
3.4. SUPERFICIE NO CONVENCIONAL.	35
3.5. CONDICIONES AMBIENTALES	36
3.5. MATERIALES Y EQUIPOS:	38
3.5.1. Módulos Fotovoltaicos Flexibles.....	38
3.5.2. Maximum Power Point Tracker – MPPT (Seguidor del punto de máxima potencia)...	39
3.6. INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICO FLEXIBLES.....	41

3.6.1. Superficie Horizontal.....	41
3.6.2. Superficie Cilíndrica.....	42
3.6.3. Superficie Curva.....	42
3.7. PROCEDIMIENTO DE MONITOREO:.....	43
3.7.1. Superficie Horizontal.....	46
3.7.2. Superficie Cilíndrica.....	47
3.7.3. Superficie Curva.....	49
3.8. ANÁLISIS DE DATOS Y VALIDACIÓN.....	50
3.8.1. Modelo de Hipótesis.....	50
3.8.2. Análisis Ambiental.....	50
3.8.3. Análisis Eléctrico - Superficie Horizontal.....	52
3.8.4. Análisis Eléctrico - Superficie Cilíndrica.....	55
3.8.5. Análisis Eléctrico - Superficie Curva.....	57
3.8.6. Análisis Eléctrico Voltaje – Parámetros eléctricos.....	60
3.8.7. Análisis Eléctrico Intensidad – Parámetros eléctricos.....	62
3.8.8. Análisis Eléctrico Potencia – Parámetros eléctricos.....	64
3.9. ANÁLISIS DE FACTOR CAMPO.....	66
3.9.1. FF_PL (Superficie Plana):.....	67
3.9.2. FF_CIL (Superficie Cilíndrico):.....	67
3.9.3. FF_CUR (Superficie Curvo):.....	67
3.9.4. Comparación entre las Configuraciones:.....	68
3.9.5. Validación de los Datos:.....	68
3.10. ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA (H).....	69
3.10.1. n_PL (Superficie Plana):.....	70
3.10.2. n_CIL (Superficie Cilíndrica):.....	70
3.10.3. n_CUR (Superficie Curva):.....	71
3.10.4. Implicaciones para la generación fotovoltaica en superficies no convencionales:	71
CONCLUSIONES.....	72
IMPLICACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES PRÁCTICAS.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS:.....	75
ANEXOS.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Funcionamiento de los paneles fotovoltaico.....	10
Figura 2: Capas de constitución de panel rígido monocristalino / policristalino	11
Figura 3: Capas de constitución de panel flexible.....	12
Figura 4: Estructura aplicada – techos curvos.....	16
Figura 5: Estructura aplicada – techos cilíndrica.....	16
Figura 6: Estructura aplicada – techos amorfos.....	17
Figura 7: Medición de corriente de cortocircuito	18
Figura 8: Medición de corriente de cortocircuito	19
Figura 9: Potencia máxima, en función de corriente y voltaje	20
Figura 10: Variación de potencia máxima en función de irradiancia.....	20
Figura 11: Metodología aplicada.....	27
Figura 12: Georreferencia Ubicación Proyecto	29
Figura 13: Horizonte y Trayectoria Solar en el Sitio.....	30
Figura 14: Duración del Día y Ángulo Cenital Solar	31
Figura 15: Irradiación Global Horizontal Wh/m ²	32
Figura 16: Irradiación global horizontal.....	33
Figura 17: Datos de Irradiancia Global Horizontal – 17 de agosto del 2024	34
Figura 18: Formas de superficie aplicadas.	35
Figura 19: Temperatura medio ambiente - sitio	37
Figura 20: Velocidad del viento - sitio	37
Figura 21: Humedad relativa - sitio.....	38
Figura 22: Panel solar BougerRV 100W CIGS.....	39
Figura 23: Controlador MPPT 100/30.....	40
Figura 24: Superficie Plana - Aplicada.....	41
Figura 25: Superficie Cilindro - Aplicada	42
Figura 26: Superficie Esférica - Aplicada	43
Figura 27: Generación de Potencia en función de irradiancia - Horizontal	53
Figura 28: Matriz de Correlación de Variables Electrica – Horizontal.....	53
Figura 29: Generación de Potencia en función de irradiancia - Vertical.....	55
Figura 30: Generación de Potencia en función de irradiancia - Curva.....	58

Figura 31: Comparativa de voltajes en diferentes superficies	61
Figura 32: Comparativa de intensidad en diferentes superficies	63
Figura 33: Comparativa de potencia en diferentes superficies	65
Figura 34: Factor de Campo – Plano – Cilindro - Curva.....	67
Figura 35: : Eficiencia de conversión – Plano – Cilindro - Curva	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información de valores típicos de paneles fotovoltaico fotovoltaicas.....	10
Tabla 2: Comparativa descriptiva de paneles fotovoltaico	12
Tabla 3: Lista de materiales para construcción de paneles fotovoltaico-flexibles.	13
Tabla 4: Procesos de construcción de paneles fotovoltaico.....	14
Tabla 5: Ventajas y limitaciones de paneles flexibles.	15
Tabla 6: Comparativa descriptiva de las aplicaciones de paneles fotovoltaico.....	17
Tabla 7: Rango de Operación de panel solar.	22
Tabla 8: Impacto en la Operación de panel solar.....	23
Tabla 9: Eficiencia en la Operación de panel solar.	24
Tabla 10: Información de Ubicación Proyecto	29
Tabla 11: Hora de inicio de 17 de agosto del 2024.	31
Tabla 12: Datos de Irradiancia Global Horizontal.....	34
Tabla 13: Condiciones de implementación – superficie plana.	36
Tabla 14: Condiciones de implementación – superficie cilíndrica.....	36
Tabla 15: Condiciones de implementación – superficie esférica.	36
Tabla 16: Ficha técnica panel solar flexible.	39
Tabla 17: <i>Ficha técnica - MPPT</i>	40
Tabla 18: Intervalo de recolección de datos	43
Tabla 19: Situación medio ambiental	43
Tabla 20: Parámetros eléctricos panel fotovoltaico	44
Tabla 21: Variables - Unidad de medida	44
Tabla 22: Datos Medio Ambiente - Sitio.....	45
Tabla 23: Parámetros Eléctricos - Panel Horizontal.....	46
Tabla 24: Datos de Irradiancia circundante	47
Tabla 25: Parámetros Eléctricos - Panel Cilíndrica.	48
Tabla 26: Parametros Electricos - Panel Curvo.....	49
Tabla 27: Matriz de Correlación de Variables Ambiental.....	51
Tabla 28: Matriz de Correlación de Variables Eléctrica – Vertical.....	56
Tabla 29: Matriz de Correlación de Variables Eléctrica – Curvo.....	58

INTRODUCCIÓN

Tema

Evaluación de los parámetros técnicos y eficiencia de conversión energética de Paneles Fotovoltaico Flexibles de Película Fina en Superficies No Convencionales.

Planteamiento del Problema

La necesidad de soluciones energéticas sostenibles es cada vez más urgente debido al aumento de la paulatina demanda de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero por generación eléctrica. Los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina han surgido como una tecnología innovadora para superar las limitaciones de los paneles rígidos tradicionales, especialmente en superficies no convencionales como techos curvos y estructuras cilíndricas. Sin embargo, a pesar de su potencial, existe una falta significativa de datos empíricos y estudios detallados que evalúen su desempeño en condiciones reales.

El desafío principal radica en la escasa comprensión del rendimiento de estos paneles en diversas configuraciones y condiciones ambientales. A pesar de las promesas de eficiencia y versatilidad, no se dispone de suficiente información sobre parámetros críticos como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), la potencia - eficiencia (η) y factor de llenado (FF) en diferentes superficies y bajo condiciones climáticas variables. Esta falta de datos específicos impide la optimización de los sistemas fotovoltaicos flexibles, lo que podría llevar a una subutilización de su potencial energético.

Además, la integración de estos paneles en entornos urbanos densos y estructuras arquitectónicas complejas presenta desafíos adicionales, como la necesidad de armonización estética y la consideración de la resistencia estructural. La ausencia de un análisis exhaustivo y comparativo que abarque estos aspectos limita la adopción generalizada de esta tecnología, afectando negativamente su implementación efectiva en aplicaciones prácticas y su contribución a la disminución de la presentación de dióxido de carbono.

Problema científico

La falta de comprensión empírica y detallada sobre el rendimiento y la eficiencia de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina en diferentes configuraciones y condiciones ambientales, así como su integración en entornos urbanos complejos, lo que limita la optimización y adopción efectiva de esta tecnología en aplicaciones prácticas.

Este problema abarca tanto la necesidad de obtener y analizar datos específicos sobre el rendimiento de estos paneles en diversas situaciones, como la comprensión de los desafíos adicionales que surgen de su implementación en entornos urbanos y arquitectónicos complejos.

Preguntas científicas o directrices

¿Cuál es el rendimiento y la eficiencia de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina en comparación con los paneles rígidos tradicionales bajo diversas condiciones climáticas y configuraciones de instalación?

¿Cómo varían parámetros críticos como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), la potencia - eficiencia (η) y factor de llenado (FF) en diferentes superficies y bajo diferentes condiciones ambientales?

¿Cómo afectan las condiciones de instalación en superficies no convencionales (techos curvos, estructuras cilíndricas) al rendimiento de los paneles fotovoltaico-flexibles?

¿Qué impactos tienen las características geométricas de las superficies sobre la captación de energía y la eficiencia operativa de estos paneles?

Objetivo general

Evaluar los parámetros técnicos y la eficiencia de conversión energética de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina, a través de un análisis comparativo y monitoreo de su desempeño en diversas superficies no convencionales, con el fin de identificar las configuraciones que optimicen la eficiencia energética y promuevan su uso en infraestructuras complejas y sostenibles.

Objetivos específicos

- Realizar mediciones y análisis detallados de parámetros técnicos fundamentales, como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), la potencia - eficiencia (η) y factor de llenado (FF), en paneles fotovoltaico flexibles instalados en superficies planas, esféricas y cilíndricas.
- Evaluar y comparar el rendimiento energético de los paneles fotovoltaico-flexibles en diversas configuraciones de instalación, identificando las variaciones en eficiencia y producción energética.

- Realizar un monitoreo continuo y exhaustivo del desempeño de los paneles fotovoltaico-flexibles en un entorno real, recopilando datos sobre su operación y eficiencia.
- Elaborar y difundir informes técnicos y publicaciones científicas detalladas que resuman los resultados del estudio, proporcionando conclusiones y recomendaciones basadas en los datos empíricos obtenidos.

Justificación

En un contexto global marcado por el creciente desafío de amortiguar las emisiones de gases de efecto invernadero y satisfacer una demanda energética en constante aumento, las soluciones energéticas sostenibles se han convertido en una necesidad apremiante. Entre las innovaciones emergentes en el área de la energía solar, los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina destacan por su capacidad para superar las limitaciones inherentes a los paneles fotovoltaico-rígidos tradicionales, particularmente en la adaptación a superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas.

A pesar de su promesa, la adopción generalizada de esta tecnología se ha visto limitada por una falta significativa de datos empíricos que permitan evaluar su rendimiento bajo condiciones reales. La comprensión incompleta de los parámetros técnicos críticos, como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), la potencia - eficiencia (η) y factor de llenado (FF), en diversas configuraciones y condiciones ambientales, impide la optimización de estos sistemas fotovoltaicos flexibles. Este vacío de conocimiento podría llevar a una subutilización de su potencial energético, lo que tendría repercusiones negativas en su capacidad para contribuir eficazmente a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Además, la implementación de paneles fotovoltaico-flexibles en entornos urbanos densos y en estructuras arquitectónicas complejas presenta desafíos adicionales, como la armonización estética y la necesidad de garantizar la resistencia estructural. La falta de estudios exhaustivos y comparativos que aborden estos aspectos complica la integración efectiva de esta tecnología en aplicaciones prácticas, lo que limita su potencial para reducir significativamente la emisión de dióxido de carbono de las ciudades.

Por lo tanto, la investigación sobre la evaluación de los parámetros técnicos y la eficiencia de conversión energética de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina en superficies no convencionales es de vital importancia. Esta investigación no solo proporcionará

los datos empíricos necesarios para optimizar el rendimiento de estos sistemas, sino que también facilitará su integración en el diseño arquitectónico y urbano. De este modo, se podrán maximizar los beneficios ambientales y energéticos de esta tecnología innovadora, contribuyendo a una reducción sustancial de las emisiones de carbono y al avance hacia un futuro energético más sostenible.

Las principales variables que se presentan en el trabajo son las siguientes:

Variables Independientes

Tipo de Superficie de Instalación:

- Superficies planas
- Superficies curvadas (techos curvos, estructuras cilíndricas)
- Superficies inclinadas

Condiciones Ambientales:

- Intensidad de radiación solar
- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Presencia de sombras parciales

Configuración del Panel Solar:

- Orientación (ángulo de inclinación y azimut)

Variables Dependientes

Rendimiento Energético del Panel:

- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Voltaje máximo que el panel puede generar en condiciones de circuito abierto.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): Corriente máxima que el panel puede generar en condiciones de cortocircuito.
- Potencia-eficiencia (η): Eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica.
- Factor de llenado (FF): Relación entre la potencia máxima generada y el producto del voltaje y corriente en condiciones de circuito abierto y cortocircuito, respectivamente.

Eficiencia de Conversión Energética:

- Energía generada (kWh) por metro cuadrado de panel solar en un período determinado.

- Relación entre la energía solar incidente y la energía eléctrica generada por los paneles en diferentes condiciones de superficie y ambiente.

Variables Constantes

Tipo de Material del Panel Solar:

- Material utilizado en la fabricación del panel solar flexible de película fina.

Estas variables guiarán la investigación para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los paneles fotovoltaico-flexibles, así como para comprender cómo estas tecnologías pueden optimizarse para aplicaciones en superficies no convencionales.

Idea a defender y/o Hipótesis

Los paneles fotovoltaico flexibles de película fina instalados en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas, presentan un rendimiento energético y una eficiencia de conversión comparables o superiores a los paneles fotovoltaico rígidos tradicionales, siempre que se optimicen las condiciones de instalación y se adapten a las variaciones ambientales, lo que podría potenciar su adopción en entornos urbanos densos y contribuir significativamente a la reducción de la emisión de dióxido de carbono.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1.Introducción a la Energía Solar y su Relevancia Actual

La demanda global de energía sigue en aumento a medida que las economías se expanden y las poblaciones crecen. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) (International Energy Agency, 2024), el consumo global de electricidad crecerá un 3% anual hasta 2026, impulsado principalmente por las economías emergentes y la creciente electrificación en sectores industriales y domésticos (Iea, 2024). Este crecimiento ha puesto de manifiesto la necesidad urgente de soluciones energéticas sostenibles, ya que una gran parte de la energía actual aún proviene de fuentes no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural, que representan el 84% de la matriz energética mundial (Energy Agency, 2021a). Este escenario global subraya la importancia de transitar hacia energías limpias, donde la energía solar ha emergido como un pilar fundamental.

A nivel macro, el impacto ambiental de la creciente demanda energética ha sido significativo, particularmente por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En 2021, las emisiones globales relacionadas con la energía alcanzaron 36.3 gigatoneladas de CO₂, recuperándose de la caída temporal que se observó durante la pandemia de COVID-19 (Energy Agency, 2021a). Este aumento ha intensificado la presión para acelerar la transición a fuentes renovables. En este contexto, la energía solar fotovoltaica ha jugado un papel clave. A pesar de las interrupciones causadas por la pandemia, las energías renovables mostraron una notable resiliencia, con un crecimiento del 7% en la capacidad instalada en 2020, en gran parte impulsado por la energía solar (Iea, 2024) (Energy Agency, n.d.).

En Latinoamérica, el crecimiento de la energía solar también ha sido notable. Países como Brasil, Chile y México han liderado el aumento en la capacidad instalada de energías renovables, destacando la adopción de la energía solar fotovoltaica en la región. Según datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la capacidad solar instalada en América Latina creció un 44% entre 2019 y 2021, y se espera que continúe aumentando significativamente en los próximos años debido a las políticas de fomento a energías limpias y a la reducción de costos de instalación (BID, 2021).

1.1.1. Impacto en Ecuador

A nivel meso, en Ecuador, la transición hacia fuentes renovables ha sido un desafío, pero con importantes avances. En 2020, Ecuador logró aumentar su capacidad instalada de energía solar, aunque su participación en la matriz energética nacional sigue siendo relativamente baja, representando apenas un 0.2% del total de generación eléctrica (ARCONEL, 2020). Sin embargo, el potencial solar del país es considerable, con niveles de radiación solar superiores a los 4.5 kWh/m² en regiones como la costa y la sierra, lo que lo convierte en un lugar ideal para el desarrollo de proyectos fotovoltaicos. El país ha comenzado a implementar proyectos piloto y de mayor envergadura, pero enfrenta el reto de ampliar la infraestructura e incentivar la adopción de tecnologías solares tanto a nivel industrial como residencial.

Uno de los principales obstáculos en Ecuador ha sido la falta de inversión y de políticas energéticas de largo plazo para el desarrollo de energías renovables. Sin embargo, en los últimos años, se han puesto en marcha proyectos de energías limpias que buscan reducir la dependencia de combustibles fósiles y diversificar la matriz energética. A pesar de los desafíos, el país tiene un marco regulatorio en desarrollo que fomenta la inversión en energías renovables y promueve la autogeneración a través de paneles solares (ARCONEL, 2020).

1.1.2. Problemática en la Localidad: Superficies no Convencionales

A nivel micro, el estudio se enfoca en un aspecto innovador: la implementación de paneles solares fotovoltaicos flexibles de película fina en superficies no convencionales. En Tumbaco, Ecuador, se ha identificado la necesidad de soluciones energéticas sostenibles que puedan adaptarse a estructuras arquitectónicas complejas, como techos curvos y estructuras cilíndricas, donde los paneles solares tradicionales no son viables debido a sus limitaciones estructurales y de instalación. Estas superficies no convencionales presentan un desafío en la captación eficiente de energía solar, pero también ofrecen una oportunidad significativa para aprovechar el potencial energético sin interferir con el diseño arquitectónico.

La investigación sobre paneles flexibles de película fina, instalados en techos curvos y otras superficies irregulares, ha demostrado que estos sistemas pueden alcanzar una eficiencia comparable o incluso superior a los paneles rígidos tradicionales cuando las condiciones de instalación están optimizadas. Los paneles flexibles permiten una mayor integración estética y funcional en infraestructuras existentes, lo que es clave en áreas urbanas densamente pobladas como Tumbaco. Además, las superficies no convencionales presentan un gran potencial para

optimizar la captación de energía solar en ambientes urbanos, aprovechando mejor las condiciones climáticas locales y contribuyendo a una mayor independencia energética.

1.2.Estado del Arte

El avance en la tecnología de paneles fotovoltaicos flexibles ha revolucionado el campo de la energía solar, permitiendo aplicaciones en superficies no convencionales donde los paneles tradicionales enfrentan limitaciones. Diversos estudios recientes han investigado los materiales y arquitecturas utilizados en estos paneles, con el fin de mejorar su eficiencia, durabilidad y aplicabilidad. Un aspecto clave de esta tecnología es su capacidad para adaptarse a formas arquitectónicas complejas, como techos curvos o estructuras cilíndricas, lo que ha atraído la atención de investigadores y profesionales en el campo.

Shayan et al. (2022) llevaron a cabo un análisis tecnoeconómico que destaca la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos flexibles instalados en superficies no convencionales, como silos y estructuras cilíndricas. Los resultados mostraron que estos paneles pueden producir más energía anual que los sistemas tradicionales en superficies planas, con un rango de producción de entre 810 kWh en superficies planas y hasta 1000 kWh en superficies hemisféricas. Este enfoque destaca cómo la adaptabilidad y facilidad de instalación de los paneles flexibles superan los costos iniciales en aplicaciones arquitectónicas complejas. Esta idea se complementa con el trabajo de Hu et al. (2021), que desarrollaron una arquitectura interfacial híbrida utilizando puntos cuánticos de perovskita, logrando mejoras en la eficiencia de conversión energética hasta un 12.3%, junto con una mayor estabilidad mecánica. Ambos estudios resaltan la importancia de seguir investigando materiales avanzados para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los paneles en aplicaciones reales.(Hu et al., 2021; Shayan et al., 2022)

Kim, Hoang y Bark (2021) analizaron las tecnologías basadas en silicio para dispositivos fotovoltaicos flexibles, abordando tanto los mecanismos básicos como las tecnologías de fabricación. Estos investigadores encontraron que las celdas flexibles de silicio pueden alcanzar eficiencias superiores al 12% cuando se utilizan técnicas avanzadas de deposición a baja temperatura, destacando la importancia de optimizar los procesos de fabricación para producir dispositivos eficientes a gran escala (S. Kim et al., 2021). Dallaev et al. (2023) también investigaron diferentes materiales, como el di seleniuro de cobre-indio-galio (CIGS) y las perovskitas. Concluyeron que, aunque los CIGS ofrecen mayor estabilidad

térmica, las perovskitas emergen como una opción prometedora debido a su alta eficiencia y menor costo de fabricación (Dallaev et al., 2023).

En cuanto a la durabilidad de los paneles fotovoltaicos flexibles, Zhu et al. (2019) revisaron las tecnologías fotovoltaicas flexibles, evaluando los avances en materiales y procesos de fabricación. Los resultados indicaron que los paneles basados en CIGS y perovskitas presentan un equilibrio óptimo entre eficiencia, flexibilidad y costo, lo que los convierte en opciones viables para aplicaciones en superficies arquitectónicas complejas (Zhu et al., 2019). En un contexto urbano, Nusrat et al. (2024) exploraron la aplicación de paneles fotovoltaicos flexibles en edificios de energía casi nula (nZEB), demostrando que la integración en fachadas y techos curvos puede reducir la demanda energética del edificio hasta en un 30%, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad urbana (Nusrat et al., 2024).

Por su parte, Jiang et al. (2021) analizaron las celdas fotovoltaicas flexibles basadas en materiales avanzados como las perovskitas, mostrando que estas pueden alcanzar eficiencias de hasta el 18% al optimizar las capas intermedias y perfeccionar los procesos de fabricación. Este estudio es fundamental para el desarrollo de la próxima generación de paneles fotovoltaicos flexibles que combinen alta eficiencia con la flexibilidad necesaria para aplicaciones innovadoras (Huang, 2017). Finalmente, Bovesecchi et al. (2024) investigaron la implementación de sistemas fotovoltaicos flexibles en la región de Lazio, Italia. Este estudio mostró cómo estos sistemas han sido integrados en infraestructuras existentes y nuevas construcciones, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables. Los resultados subrayan la importancia de adaptar estas tecnologías a contextos específicos para maximizar su impacto positivo en el desarrollo sostenible (Bovesecchi et al., 2024).

1.3. Teórico – Conceptual

1.3.1. Principios de funcionamiento de los paneles fotovoltaico.

El principio básico de funcionamiento de los paneles fotovoltaico es el efecto fotovoltaico, donde un material semiconductor, como el silicio, absorbe fotones de la luz solar, liberando electrones que generan una corriente eléctrica directa (DC) (Luque & Hegedus, 2018).

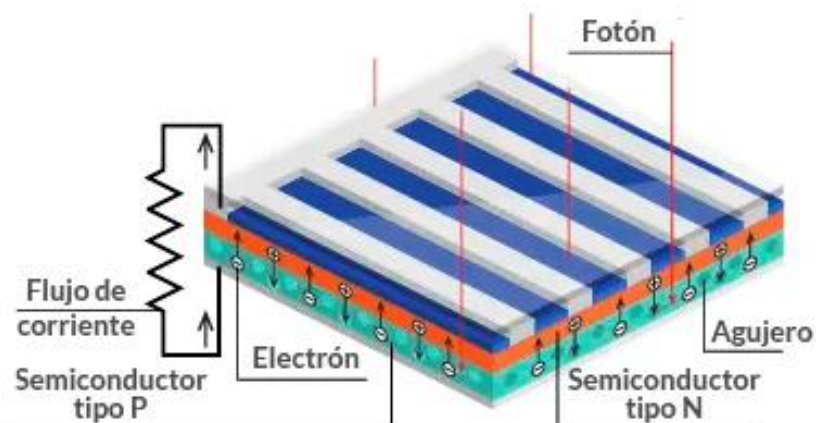


Figura 1: Funcionamiento de los paneles fotovoltaico

Nota: Esta figura muestra la interacción de componentes para el desarrollo de voltaje en corriente directa.
Fuente: Propia

Los parámetros clave que determinan el rendimiento de un panel solar incluyen la eficiencia de conversión, el factor de llenado (FF), y la corriente de cortocircuito (I_{sc}). Estos parámetros varían según el tipo de material y las condiciones operativas del panel, lo que influye directamente en la capacidad del panel para convertir la energía solar en electricidad utilizable (Luque & Hegedus, 2018).

Tabla 1: Información de valores típicos de paneles fotovoltaico fotovoltaicas

Parámetro	Definición	Valores Típicos
Eficiencia de Conversión (%)	Relación de energía captada y energía eléctrica generada	10 - 22
Factor de Campo (FF)	Relación de potencia máxima y producto de voltaje y corriente	0.7 - 0.85
Corriente de Cortocircuito (I_{sc})	Corriente máxima en cortocircuito	Tecnología y tamaño

Nota: Esta tabla muestra los parámetros que se consideran en un panel solar fotovoltaico.
Fuente: (Green et al., 2018)

1.3.2. Tecnología de Paneles Fotovoltaico

La tecnología de paneles fotovoltaico ha revolucionado la forma en que capturamos y utilizamos la energía solar, convirtiéndola en una fuente de electricidad limpia y sostenible. Existen diversos tipos de paneles fotovoltaico, entre los que destacan los rígidos y los flexibles, cada uno con características y aplicaciones específicas. Esta diversidad en la tecnología de

paneles fotovoltaico permite una integración más amplia de la energía solar en distintos contextos, promoviendo una transición energética hacia fuentes más sostenibles.

Tipos de paneles fotovoltaico: rígidos vs. flexibles.

Los paneles fotovoltaicos se clasifican principalmente en dos tipos: rígidos y flexibles. Los paneles rígidos, fabricados predominantemente con silicio cristalino, son los más utilizados en aplicaciones residenciales, comerciales y a gran escala. Su construcción robusta, que incluye un marco de aluminio y una cubierta de vidrio templado, proporciona alta durabilidad con una eficiencia de conversión energética que varía entre el 18% y el 22%. Estos paneles tienen una vida útil superior a 25 años, lo que los hace adecuados para instalaciones donde la longevidad y la resistencia son críticas (Green et al., 2018) (Ise & Projects GmbH, 2024).

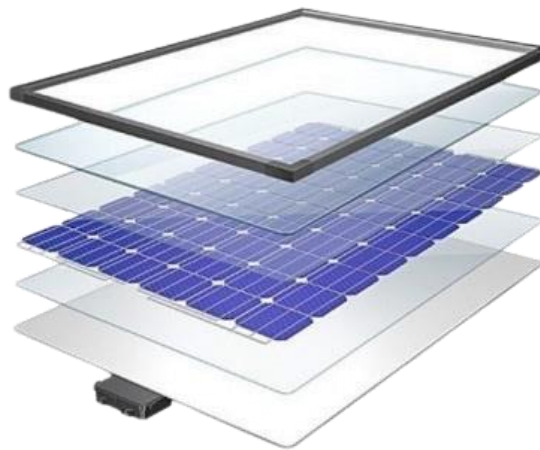


Figura 2: *Capas de constitución de panel rígido monocristalino / policristalino*
Nota: Esta figura muestra las capas que constituyen los paneles fotovoltaico-rígidos monocristalino/policristalino.

Fuente: Propia

Por otro lado, los paneles flexibles están fabricados con materiales de película fina como el telurio de cadmio (CdTe), el di seleniuro de cobre-indio-galio (CIGS), y el silicio amorfo. Estos paneles son significativamente más ligeros y flexibles, permitiendo su uso en superficies irregulares como techos curvos y vehículos. Sin embargo, la eficiencia de estos paneles suele ser menor, oscilando entre el 10% y el 12%, lo que puede requerir una mayor superficie para generar la misma cantidad de electricidad que los paneles rígidos (Zhu et al., 2019).

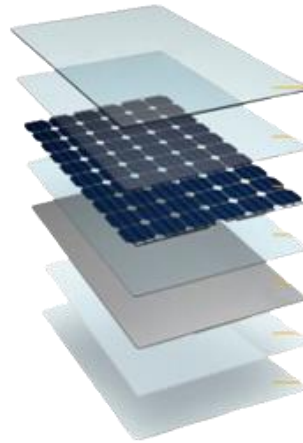


Figura 3: Capas de constitución de panel flexible.

Nota: Esta figura muestra las capas que constituyen el panel solar flexible.
Fuente: Propia

Tabla 2: Comparativa descriptiva de paneles fotovoltaico

Tipo de Panel	Material Principal	Eficiencia (%)	Peso (kg/m²)	Durabilidad (años)
Rígido (Silicio Cristalino)	Silicio Monocristalino / Policristalino	18 - 22	12 - 15	25+
Flexible (película Fina)	CdTe, CIGS, Silicio Amorfo	10 - 12	3 - 5	10 - 15

Nota: Esta tabla muestra el resumen de las características de los tipos de panel existente.
Fuente: (Green et al., 2018)

1.3.3. Paneles Fotovoltaico Flexibles de Película Fina

Los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina representan una innovadora evolución en la tecnología fotovoltaica, ofreciendo soluciones energéticas versátiles y adaptables para una amplia gama de aplicaciones. A diferencia de los paneles fotovoltaico-rígidos tradicionales, estos paneles están diseñados con materiales semiconductores ultradelgados.

Características técnicas y materiales utilizados.

Los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina están contruidos utilizando una variedad de materiales semiconductores que permiten la captura de la energía solar y su conversión en electricidad. Los materiales más comúnmente utilizados en estos paneles incluyen:

Teluro de Cadmio (CdTe): Este material es conocido por su bajo costo de fabricación y su eficiencia relativamente alta en condiciones de baja irradiancia. Los paneles de CdTe tienen una eficiencia típica del 10% al 12% y se destacan por su estabilidad a largo plazo y su capacidad para mantener el rendimiento bajo condiciones de luz difusa o indirecta. Sin embargo, el uso de cadmio, un material tóxico, plantea desafíos ambientales y de manejo (H. Kim et al., 2014).

Di seleniuro de Cobre-Indio-Galio (CIGS): Los paneles basados en CIGS ofrecen una eficiencia más alta en comparación con otros materiales de película fina, alcanzando hasta un 13% en condiciones óptimas. CIGS tiene la ventaja de ser menos tóxico que CdTe y de presentar una mejor performance en términos de degradación bajo exposición prolongada a la luz y la temperatura. Estos paneles son particularmente adecuados para aplicaciones que requieren flexibilidad y durabilidad (Yang et al., 2017).

Silicio Amorfo (a-Si): Aunque presenta la eficiencia más baja entre los materiales de película fina (entre 6% y 10%), el silicio amorfo es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y facilidad de producción. Los paneles de silicio amorfo son altamente flexibles y se pueden fabricar en formas y tamaños personalizados, lo que los hace ideales para aplicaciones portátiles y en superficies irregulares (2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) : Date, 5-10 June 2016, 2016).

Tabla 3: Lista de materiales para construcción de paneles fotovoltaico-flexibles.

Material	Eficiencia Típica (%)	Ventajas	Limitaciones
Teluro de Cadmio (CdTe)	10 - 12	Bajos costo Eficiente en baja luz	Material tóxico Menor durabilidad
CIGS	11 - 13	Mayor eficiencia Menor impacto ambiental	Complejidad de fabricación
Silicio Amorfo (a-Si)	6 - 10	Bajo costo Flexible	Muy baja eficiencia Rápida degradación

Nota: Esta tabla muestra las características típicas de los materiales utilizados en paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: Propia

1.3.4. Procesos de fabricación y tecnología de deposición de película fina.

La fabricación de paneles fotovoltaico-flexibles de película fina implica técnicas avanzadas para depositar materiales semiconductores sobre sustratos flexibles. Los procesos más comúnmente utilizados incluyen:

Depósito Químico de Vapor (CVD): En este proceso, los materiales semiconductores son depositados en forma de vapor sobre un sustrato a través de reacciones químicas controladas. CVD es ampliamente utilizado para la fabricación de paneles de silicio amorfo debido a su capacidad para producir capas uniformes y delgadas. Este proceso es altamente escalable y permite la producción a gran escala de paneles flexibles (Chopra et al., 2004).

Sputtering (Pulverización Catódica): Este método se utiliza principalmente en la fabricación de paneles CIGS. Durante el proceso, los átomos de un material objetivo (como cobre, indio, galio y selenio) son eyectados por la acción de un plasma y depositados sobre el sustrato. Sputtering es apreciado por su precisión y control sobre la composición y el espesor de las capas depositadas, lo que es crucial para lograr altos niveles de eficiencia en los paneles (Yang et al., 2017).

Depósito Electroquímico: Este proceso involucra la deposición de materiales semiconductores a partir de una solución electrolítica. Es particularmente adecuado para la fabricación de películas delgadas de CdTe, ya que permite un control preciso de la composición y el grosor de las capas depositadas. Este método es relativamente más económico y se adapta bien a la producción de paneles fotovoltaico a gran escala.

Tabla 4: Procesos de construcción de paneles fotovoltaico.

Proceso de Fabricación	Materiales Asociados	Ventajas	Limitaciones
Depósito Químico de Vapor (CVD)	Silicio Amorfo	Capas uniformes Delgadas	Costoso Control preciso
Sputtering	CIGS	Alta precisión Control sobre el espesor	Proceso complejo Alto consumo energético
Depósito Electroquímico	CdTe	Económico Uniformidad de capas	Desafíos con la estabilidad Toxicidad

Nota: Esta tabla muestra el proceso de fabricación con material asociado y sus ventajas.
Fuente: Propia

1.3.5. Ventajas y limitaciones de los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina.

Los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina ofrecen varias ventajas significativas. Su ligereza y flexibilidad permiten su instalación en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras arquitectónicas complejas. Además, su proceso de fabricación generalmente requiere menos material y energía, lo que reduce el impacto ambiental inicial. Sin embargo, presentan una eficiencia de conversión energética inferior a la de los paneles rígidos, lo que significa que se requiere una mayor superficie para generar la misma cantidad de electricidad. Además, su durabilidad puede verse comprometida en condiciones ambientales adversas, lo que puede afectar su rendimiento a largo plazo (Green et al., 2018).

Tabla 5: Ventajas y limitaciones de paneles flexibles.

Ventajas	Limitaciones
Ligero y flexibles	Menor eficiencia de conversión energética
Instalación en superficies irregulares	Susceptibles a la degradación ambiental
Menos impacto ambiental inicial	Vida útil más corta en comparación con paneles rígidos.

Nota: Esta tabla muestra las características que sobresalen en los paneles fotovoltaico-flexibles.

Fuente: (Luque & Hegedus, 2018)

1.3.6. Aplicaciones en superficies no convencionales

Los paneles fotovoltaico-flexibles de película fina se destacan por su capacidad de adaptarse a superficies no convencionales, lo que los hace ideales para su uso en diversos entornos urbanos y arquitectónicos innovadores, donde los paneles fotovoltaico-rígidos tradicionales no serían adecuados.

Estructuras Techos Curvos

Los techos curvos son una de las aplicaciones más comunes para los paneles fotovoltaico-flexibles. En muchas estructuras modernas, especialmente en edificios comerciales e industriales, los techos curvos presentan desafíos de instalación para los paneles rígidos. Sin embargo, los paneles de película fina pueden adaptarse fácilmente a estas superficies, permitiendo una cobertura completa sin la necesidad de estructuras adicionales de

soporte. Esto no solo maximiza la captación solar, sino que también reduce los costos asociados con la instalación, logrando una integración tanto estética como funcional (Liu et al., 2023).

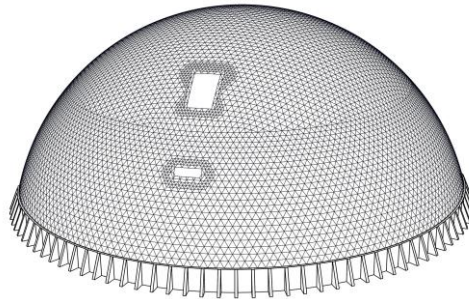


Figura 4: Estructura aplicada – techos curvos.

Nota: Esta figura muestra la posible superficie curva de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: Propia

Estructuras Cilíndricas

Las estructuras cilíndricas, como torres de agua, tanques de almacenamiento y chimeneas industriales, representan un desafío único para la instalación de paneles fotovoltaico-tradicionales. Dado que los paneles rígidos no pueden envolverse alrededor de superficies curvas, gran parte de estas áreas quedan inutilizadas para la generación de energía. Los paneles fotovoltaico-flexibles, por su parte, pueden envolver estas estructuras, permitiendo la generación de energía en áreas previamente no aprovechadas. Esta aplicación es especialmente valiosa en entornos industriales donde el espacio para instalaciones fotovoltaico es limitado (Chen et al., 2019).

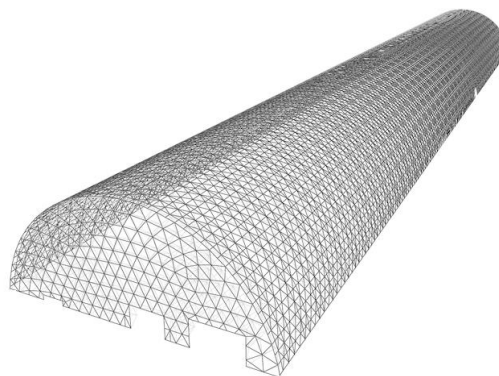


Figura 5: Estructura aplicada – techos cilíndrica.

Nota: Esta figura muestra la posible superficie cilíndrica de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: Propia

Estructura Geometrías Complejas

Además de techos curvos y estructuras cilíndricas, los paneles fotovoltaico-flexibles son ideales para una variedad de geometrías complejas. Estos paneles pueden ser utilizados en fachadas de edificios con diseños irregulares, cúpulas y vehículos como autobuses y camiones, donde la integración de paneles rígidos no es práctica. La capacidad de los paneles flexibles para conformarse a superficies no planas sin comprometer su eficiencia los convierte en una solución versátil para la generación de energía en contextos donde la estética y la funcionalidad son cruciales (Ramanujam et al., 2020).

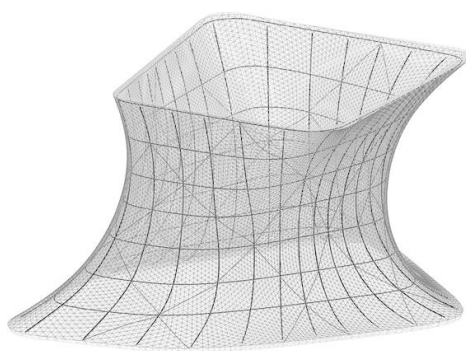


Figura 6: Estructura aplicada – techos amorfos.

Nota: Esta figura muestra la posible superficie complejas de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: Propia

Tabla 6: Comparativa descriptiva de las aplicaciones de paneles fotovoltaico.

Aplicación	Beneficios	Ejemplos de Uso
Techos Curvos	Máximo aprovechamiento del área Reducción de costos de soporte	Edificios comerciales Instalaciones industriales
Estructuras Cilíndricas	Aprovechamiento de superficies no convencionales	Torres de agua Tanques de almacenamiento
Geometrías Complejas	Integración estética y funcional en diseños innovadores	Fachadas Cúpulas Vehículos

Nota: Esta figura muestra la posible superficie complejas de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: Propia

1.3.7. *Parámetros Técnicos de Rendimiento*

Son fundamentales para evaluar la eficiencia y la durabilidad de los paneles fotovoltaico. Estos parámetros, como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), Corriente de Cortocircuito (I_{sc}), factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión energética, proporcionan información crítica sobre la capacidad de un panel para convertir la luz solar en electricidad útil. Además, el análisis de la durabilidad y la tasa de degradación permite comprender el rendimiento a largo plazo de los paneles, asegurando que se mantenga una producción eficiente de energía a lo largo de su vida útil. Entender y optimizar estos parámetros es esencial para el diseño y la implementación efectiva de sistemas fotovoltaico-sostenibles.

Corriente de Cortocircuito (I_{sc}) y Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc})

Corriente de Cortocircuito (I_{sc}): Es la corriente máxima que puede producir un panel solar cuando los terminales están en cortocircuito (es decir, $V = 0$). Se mide bajo condiciones estándar de prueba (STC) y es un parámetro clave para dimensionar sistemas fotovoltaicos (Weiß et al., 2022).

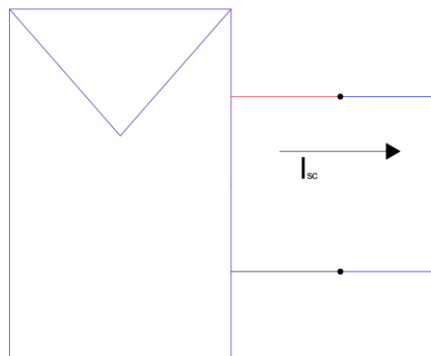


Figura 7: *Medición de corriente de cortocircuito*

Nota: Esta figura muestra la conexión para la medición de cortocircuito en un panel solar.

Fuente: Propia

Relevancia en la Evaluación del Rendimiento:

I_{sc} es crucial para determinar la corriente máxima que el panel puede entregar en condiciones óptimas. Es un indicador de la capacidad del panel para convertir la energía luminosa en corriente eléctrica (Green et al., 2018).

Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}): Es el voltaje máximo que puede generar un panel solar cuando no fluye corriente a través del circuito (es decir, $I = 0$). También se mide bajo condiciones estándar de prueba (Panagoda et al., 2023).

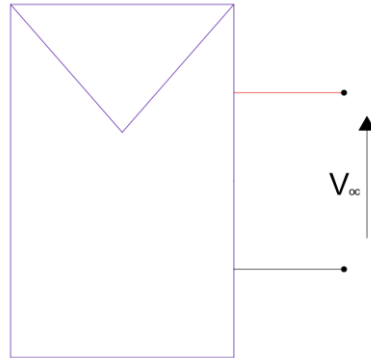


Figura 8: Medición de corriente de cortocircuito

Nota: Esta figura muestra la conexión para la medición de voltaje en circuito abierto en un panel solar.
Fuente: Propia

V_{oc} es importante para calcular el número de paneles necesarios en serie para alcanzar el voltaje requerido por el inversor o la carga (Panagoda et al., 2023).

Factor de Llenado (FF)

El Factor de Llenado (FF) es un parámetro crucial en la caracterización de la eficiencia de un panel solar fotovoltaico. El FF se define como la relación entre la potencia máxima real que puede extraer un panel solar y el producto del voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}). Matemáticamente, se expresa como:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Donde:

P_{max} es la potencia máxima que el panel puede entregar

V_m es el voltaje en el punto de máxima potencia

I_m es la corriente en el punto máximo potencia.

El FF es un indicador de la calidad del panel solar. Un FF más alto indica un panel más eficiente, ya que significa que el panel se acerca más a su capacidad teórica de conversión de

energía. En general, los paneles fotovoltaicos de alta calidad tienen un FF en el rango de 0.7 a 0.85 (Zhou et al., 2017).

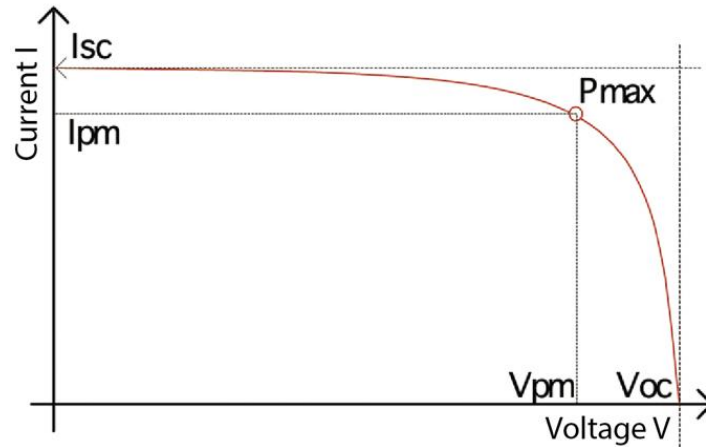


Figura 9: Potencia máxima, en función de corriente y voltaje
 Nota: Esta figura muestra la conexión para la medición de voltaje en circuito abierto en un panel solar.
 Fuente: Propia

El cálculo del FF se realiza utilizando las curvas características del panel solar, que relacionan el voltaje con la corriente bajo diferentes condiciones de iluminación. A partir de estas curvas, se determina el punto de máxima potencia (P_{max}) y se comparan con los valores de V_{oc} y I_{sc} para obtener el FF (Panagoda et al., 2023).

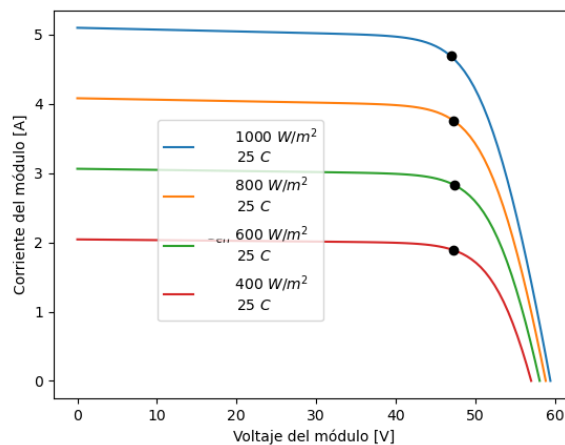


Figura 10: Variación de potencia máxima en función de irradiancia
 Nota: Esta figura muestra la conexión para la medición de voltaje en circuito abierto en un panel solar.
 Fuente: Propia

Eficiencia de conversión energética (η)

La eficiencia de conversión energética (η) es la relación entre la energía eléctrica producida por un panel y la energía fotovoltaico incidente sobre su superficie. Se expresa matemáticamente como:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times E_s}$$

P_{max} es la potencia máxima generada por el panel solar

A es el área del panel

E_s es la irradiancia solar incidente (W/m^2)

Factores que la Afectan:

Varios factores afectan la eficiencia de un panel solar, entre ellos:

- **Temperatura:** Un aumento en la temperatura generalmente reduce la eficiencia del panel, ya que aumenta la recombinación de electrones y huecos (Weiß et al., 2022).
- **Ángulo de incidencia:** La eficiencia es máxima cuando los rayos fotovoltaicos inciden perpendicularmente al panel (Panagoda et al., 2023).
- **Degradación de los materiales:** Con el tiempo, la eficiencia disminuye debido a la degradación de los materiales del panel (Zhou et al., 2017).
- **Sombras y suciedad:** La acumulación de suciedad o sombras parciales puede reducir significativamente la eficiencia (Weiß et al., 2022).

Métodos de Optimización:

- **Enfriamiento:** Sistemas de enfriamiento pasivo o activo para mantener la temperatura del panel baja.
- **Seguidores fotovoltaicos:** Dispositivos que orientan el panel para mantenerlo perpendicular a los rayos fotovoltaico (Panagoda et al., 2023).
- **Mantenimiento regular:** Limpieza y eliminación de sombras para asegurar la máxima captación de energía.

1.3.8. Impacto de Condiciones Ambientales en el Rendimiento

El rendimiento de los paneles fotovoltaico está directamente influenciado por las condiciones ambientales, como la radiación solar, la temperatura y la humedad. Estos factores determinan la eficiencia con la que los paneles convierten la luz solar en electricidad. Además, las sombras parciales y las variaciones climáticas, como la nubosidad y la acumulación de polvo, pueden reducir significativamente la producción energética. Comparar el rendimiento en entornos urbanos y rurales revela diferencias notables debido a la presencia de sombras, contaminación y exposición solar directa, lo que subraya la importancia del contexto ambiental en la operación de sistemas fotovoltaicos (Tawalbeh et al., 2021).

Influencia de la radiación solar, temperatura, y humedad en la eficiencia de los paneles.

La eficiencia de los paneles fotovoltaico está fuertemente influenciada por la radiación solar, la temperatura y la humedad. La radiación solar es el factor principal, ya que la cantidad de energía captada depende directamente de la irradiancia. Sin embargo, las altas temperaturas pueden reducir la eficiencia de conversión energética al aumentar la recombinación de electrones y huecos en los materiales semiconductores, lo que genera una disminución en la salida de potencia. Por otro lado, la humedad alta puede afectar negativamente al rendimiento de los paneles al reducir la cantidad de radiación solar que alcanza las celdas, además de acelerar la degradación de los materiales, especialmente en climas húmedos y cálidos (Bonkaney et al., 2017).

Tabla 7: Rango de Operación de panel solar.

Parámetros		Rango de Operación Típico	Impacto en la Eficiencia
Radiación (W/m ²)	Solar	200 - 1000	Directamente proporcional a la potencia generada
Temperatura (°C)		25 - 65	Cada aumento de 1°C reduce la eficiencia entre 0.3% y 0.5%
Humedad (%)	Relativa	20% - 90%	Alta humedad puede causar corrosión y reducir la vida útil del panel

Nota: Esta figura muestra la posible superficie complejas de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: (Bonkaney et al., 2017)

Efectos de sombras parciales y variaciones climáticas.

Las sombras parciales son una de las principales causas de pérdida de eficiencia en los paneles fotovoltaico. Incluso una pequeña sombra puede reducir significativamente la potencia generada, ya que las celdas en serie funcionan al nivel de la celda más débil. Las variaciones climáticas, como nubes pasajeras o cambios en la posición del sol, también afectan el rendimiento, especialmente en sistemas fotovoltaicos sin mecanismos de seguimiento solar. La acumulación de polvo y otros contaminantes en la superficie de los paneles puede agravar estos efectos, reduciendo aún más la eficiencia (Ghosh & Satya Prasad, 2024).

Tabla 8: Impacto en la Operación de panel solar.

Condición	Impacto en la Eficiencia (%)	Descripción
Sombra Parcial (10% área)	Reducción de hasta 30%	Las celdas en sombra limitan la corriente de todo el panel
Nubosidad	Reducción de 10% - 25%	Nubes densas reducen la radiación directa, afectando la producción
Acumulación de polvo	Reducción de 5% - 20%	Aumenta la reflexión de luz, disminuyendo la absorción solar

Nota: Esta figura muestra la posible superficie complejas de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: (Ghosh & Satya Prasad, 2024)

1.3.9. Comparación entre el rendimiento en entornos urbanos y rurales.

El rendimiento de los paneles fotovoltaico varía significativamente entre entornos urbanos y rurales. En áreas urbanas, la presencia de edificios altos y otras estructuras puede causar sombras más frecuentes, lo que reduce la eficiencia. Además, la mayor concentración de contaminantes en el aire urbano puede aumentar la tasa de acumulación de polvo sobre los paneles, lo que también afecta su rendimiento. En contraste, los entornos rurales, generalmente más despejados y con menos obstrucciones, permiten una mejor captación de radiación solar, lo que se traduce en un rendimiento más alto y constante a lo largo del tiempo (Tawalbeh et al., 2021).

Tabla 9: Eficiencia en la Operación de panel solar.

Entorno	Eficiencia Relativa	Condiciones Comunes		
Urbano	70% - 85%	Sombras	por	edificios
		Alta contaminación		
Rural	85% - 95%	Exposición	solar	directa
		Menor contaminación		

Nota: Esta figura muestra la posible superficie complejas de aplicación de los paneles fotovoltaico-flexibles.
Fuente: (Tawalbeh et al., 2021)

1.3.10. Normativas y Estándares Técnicos

Las normativas que regulan la instalación y operación de paneles fotovoltaico varían entre países, pero se basan en estándares internacionales establecidos por organizaciones como la International Electrotechnical Commission (IEC) y la International Organization for Standardization (ISO). Entre las normativas más relevantes se encuentran:

- IEC 61215: Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules - Design Qualification and Type Approval
- IEC 61730: Photovoltaic (PV) Module Safety Qualification
- ISO 9488: Solar Energy – Vocabulary
- IEC 61646: Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
- UL 1703: Standard for Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels
- ISO 14001: Environmental Management Systems

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

2.1. Enfoque metodológico de la investigación

La investigación se enmarca en un diseño cuantitativo y correlacional. Se ha adoptado este enfoque porque permite medir y analizar la relación entre variables ambientales, como la radiación solar, temperatura y humedad, y el rendimiento de los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina. Este enfoque cuantitativo es apropiado, ya que el estudio implica la recolección de datos numéricos precisos para analizar el comportamiento de los paneles bajo diferentes condiciones ambientales. Además, el estudio es de tipo exploratorio, lo que implica que, además de confirmar relaciones conocidas, se buscarán patrones nuevos o no anticipados. Al ser un estudio de campo, el análisis se realiza en condiciones reales, lo que proporciona resultados más aplicables y relevantes.

2.2. Población, unidades de estudio y muestra y/o Unidad de Análisis

La unidad de análisis de este estudio está constituida por los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina instalados en diversas superficies no convencionales en la región de Tumbaco, Ecuador. Se han seleccionado paneles ubicados en puntos estratégicos que representen diversas condiciones ambientales y arquitectónicas, con el objetivo de cubrir una amplia gama de situaciones reales y asegurar la aplicabilidad de los resultados en diferentes contextos. El criterio para determinar la muestra es estratégico, seleccionando ubicaciones representativas de las variaciones climáticas y estructurales que podrían influir en el rendimiento de los paneles. Esta muestra permite realizar una evaluación exhaustiva de su comportamiento en distintos entornos, con el fin de extrapolar los resultados a otras aplicaciones similares.

2.3. Métodos empíricos y técnicas empleadas para la recolección de la información

Se emplearán diversos métodos empíricos y técnicas de recolección de datos para garantizar la precisión y validez del estudio:

Revisión bibliográfica: Se analizarán estudios previos, normativas internacionales y nacionales, y los avances tecnológicos más recientes en paneles fotovoltaicos flexibles de

película fina. Esto proporcionará una base teórica sólida para la investigación y permitirá la validación de los resultados obtenidos en campo.

Observación directa in situ: Se realizará la observación directa del comportamiento de los paneles instalados en superficies no convencionales, monitoreando variables ambientales críticas como radiación solar, temperatura ambiente, y humedad. Este método es clave para evaluar el rendimiento en tiempo real y bajo condiciones reales de operación.

Medición experimental: Se utilizarán equipos especializados, tales como sensores de irradiancia solar, sensores de temperatura y multímetros. Estos instrumentos se emplearán para medir parámetros fundamentales como el voltaje de circuito abierto (Voc) y la corriente de cortocircuito (Isc). Estas mediciones se llevarán a cabo de manera continua para obtener una visión detallada del rendimiento de los paneles en diferentes momentos y bajo diversas condiciones ambientales.

Cada uno de estos métodos persigue el objetivo de obtener datos precisos y confiables que permitan evaluar la eficiencia y comportamiento de los paneles. Las mediciones se aplicarán en momentos clave del día para capturar cómo varían las variables en función de la radiación solar y la temperatura.

2.4. Procesamiento de la información obtenida de la aplicación de los métodos y técnicas

Los datos obtenidos serán organizados y tabulados utilizando herramientas estadísticas avanzadas. Los siguientes pasos se realizarán para el procesamiento de la información:

Tabulación de datos: Los datos recolectados a partir de las mediciones y observaciones serán organizados en tablas, que incluirán parámetros clave como Voc, Isc, radiación solar y temperatura.

Análisis de correlación: Se realizarán análisis de correlación para identificar la relación entre las variables ambientales y el rendimiento de los paneles. Este análisis permitirá cuantificar cómo factores como la radiación solar y la temperatura afectan el comportamiento de los paneles fotovoltaicos.

Elaboración de gráficos y tablas: A partir del análisis de los datos, se generarán gráficos y tablas explicativas que facilitarán la interpretación de los resultados. Estos incluirán

visualizaciones sobre el rendimiento de los paneles en diferentes superficies y bajo diversas condiciones climáticas.

2.5. Operacionalización de las variables

En este estudio, se ha planteado una hipótesis que sugiere que los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina instalados en superficies no convencionales, como techos curvos y estructuras cilíndricas, presentan un rendimiento energético y eficiencia de conversión comparables a los paneles rígidos tradicionales. Para validar esta hipótesis, se operacionalizan las siguientes variables:

2.5.1. Variables dependientes:

Rendimiento energético del panel: Medido a través del voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), y eficiencia de conversión energética (η).

Eficiencia de conversión energética: Medida en kWh generados por metro cuadrado de panel solar en un período determinado.

Factor de campo (FF): Relación entre la potencia máxima generada y el producto del voltaje y la corriente en condiciones de circuito abierto y cortocircuito respectivamente.

2.5.2. Variables independientes:

Tipo de superficie de instalación: Superficies planas, curvadas (techos curvos, estructuras cilíndricas) e inclinadas.

Condiciones ambientales: Radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa, y sombras parciales.

Configuración del panel solar: Orientación (ángulo de inclinación y azimut).



Figura 11: Metodología aplicada

Nota: Esta figura muestra la metodología aplicada en el proyecto.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO III

PROPUESTA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO

3.1. Fundamentos de la Propuesta

La propuesta se fundamenta en los principios estudiados en el marco teórico, especialmente en la capacidad de los paneles fotovoltaicos flexibles de película fina para integrarse en superficies no convencionales. El estudio preliminar ha demostrado que este tipo de paneles no solo son viables para optimizar el uso de superficies complejas (techos curvos, estructuras cilíndricas), sino que también presentan niveles de eficiencia comparables a los paneles rígidos tradicionales cuando se ajustan las condiciones de instalación y monitoreo. La propuesta también se apoya en la necesidad de soluciones de energía limpia para mitigar la creciente demanda de energía en entornos urbanos, como se indica en la revisión bibliográfica, donde la energía solar ha mostrado un crecimiento del 7% anual.

3.2. Presentación de la Propuesta

La propuesta incluye la instalación de paneles fotovoltaicos flexibles en tres configuraciones estructurales diferentes: superficies horizontales, cilíndricas y curvas. Estos tipos de superficies permiten estudiar el comportamiento de los paneles en entornos no convencionales, optimizando su rendimiento mediante técnicas de instalación, como adhesivos especializados y clips para superficies horizontales. Además, el uso de algoritmos de seguimiento de máxima potencia (MPPT) permitirá mejorar la eficiencia energética de los sistemas implementados.

3.3. Selección de sitio

La selección de sitios y superficies se llevará a cabo en la parroquia de Tumbaco, ubicada en la provincia de Pichincha, Ecuador. Con una elevación de 2,328 metros sobre el nivel del mar, el sitio seleccionado se caracteriza por encontrarse en una zona urbana con una densidad de población. La orientación del terreno presenta un azimut de 28° y una ligera pendiente de 2°, lo que lo convierte en un escenario idóneo para la implementación de tecnologías fotovoltaico. La ubicación en la zona horaria UTC-05, correspondiente a América/Quito, asegura una estabilidad en los patrones fotovoltaico, lo que facilita la planificación y optimización del rendimiento energético. Este proyecto busca explorar la

viabilidad y eficacia de la tecnología solar en un entorno urbano de alta densidad, contribuyendo a la generación de energía limpia y sostenible en la región.

Tabla 10: Información de Ubicación Proyecto

Información del Proyecto	
Nombre del Proyecto	Tumbaco
Dirección	Abdón Calderón G., Tumbaco, Pichincha, Ecuador
Coordenadas geográficas	-0.211346, -78.404211
Zona Horario	UTC-05, América/Guayaquil [ECT]
Elevación	2328m
Cobertura del terreno	Áreas urbanas
Densidad de población	934hab./km ²
Azimut del terreno	28°
Pendiente del terreno	2°

Nota: Esta tabla muestra la información donde se realiza la aplicación.
Fuente: (Solargis Prospect, n.d.)

A continuación, se muestra la ubicación del proyecto en la figura satelital, donde se puede apreciar la posición exacta del sitio en la parroquia de Tumbaco, resaltando sus características geográficas y urbanas clave para el desarrollo de la instalación solar.

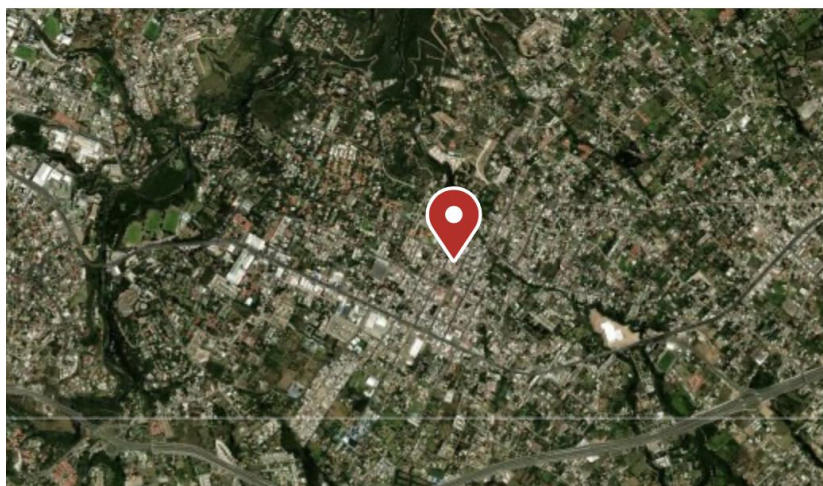


Figura 12: Georreferencia Ubicación Proyecto

Nota: Esta figura muestra la información de emplazamiento por aplicación satelital.
Fuente: Propia.

La figura 13 presenta el horizonte y la trayectoria solar en el sitio específico del proyecto ubicado en Tumbaco, evidenciando el recorrido del sol a lo largo del día en diferentes épocas del año. En el eje horizontal se encuentra representado el azimut solar, que señala la dirección cardinal (Norte, Sur, Este, Oeste), mientras que en el eje vertical se muestra la

elevación solar en grados. La zona sombreada en gris corresponde al horizonte del terreno, que define las obstrucciones naturales y construidas que limitan la captación solar. Por su parte, la zona amarilla destaca el área activa, donde la radiación solar es aprovechable para la generación de energía fotovoltaica.

Las líneas curvas dentro del gráfico delimitan las trayectorias fotovoltaico-específicas para momentos clave del año: la línea roja ilustra el solsticio de diciembre, la línea azul representa el solsticio de junio, y las líneas negras indican las trayectorias durante los equinoccios. Los puntos negros distribuidos a lo largo de estas curvas corresponden a las horas fotovoltaico, proporcionando una visualización precisa de cómo varía la posición del sol en el cielo a lo largo del día. Esta representación es esencial para evaluar las variaciones en la captación solar según la época del año, permitiendo optimizar el diseño y la orientación de los sistemas fotovoltaicos instalados en la región.

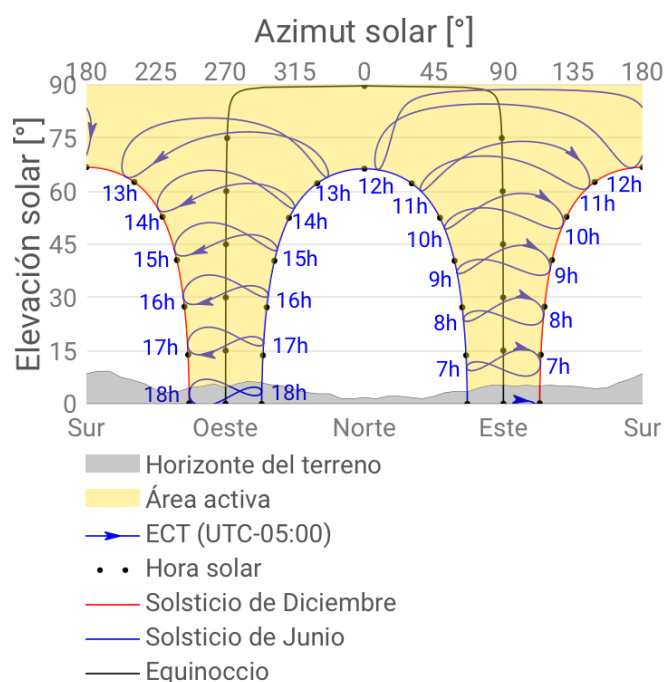


Figura 13: Horizonte y Trayectoria Solar en el Sitio

Nota: Esta figura muestra elevación y azimut, para variación de trayectoria solar.

Fuente: (Solargis Prospect, n.d.)

La figura 14 ilustra la variación de la duración del día y el ángulo cenital solar a lo largo del año en Tumbaco, proporcionando una visión detallada de estos parámetros cruciales para la optimización de sistemas fotovoltaico. En el eje izquierdo se presenta la duración del día en horas, mientras que en el eje derecho se representa el ángulo cenital mínimo en grados. Para el

mes de agosto, se observa que el ángulo cenital mínimo alcanza aproximadamente los 14 grados, lo que indica la posición más alta del sol en el cielo en ese período.

La línea azul del gráfico corresponde al ángulo cenital mínimo, el cual alcanza su valor más bajo durante el solsticio de verano, cuando el sol se encuentra más cerca del cenit. Las líneas negras, tanto sólida como discontinua, indican la duración del día y la duración del día corregida en función del horizonte, respectivamente, destacando un promedio aproximado de 12 horas de luz solar diaria.

Las marcas correspondientes a los equinoccios y solsticios destacan los momentos clave del año, mostrando cómo estos eventos astronómicos afectan la cantidad de luz solar recibida diariamente y la altura máxima del sol en el cielo. Para el 17 de agosto de 2024, los datos específicos relacionados con estos parámetros se detallan en la tabla 11, proporcionando información crítica para la evaluación del potencial energético de las instalaciones fotovoltaico en este sitio.

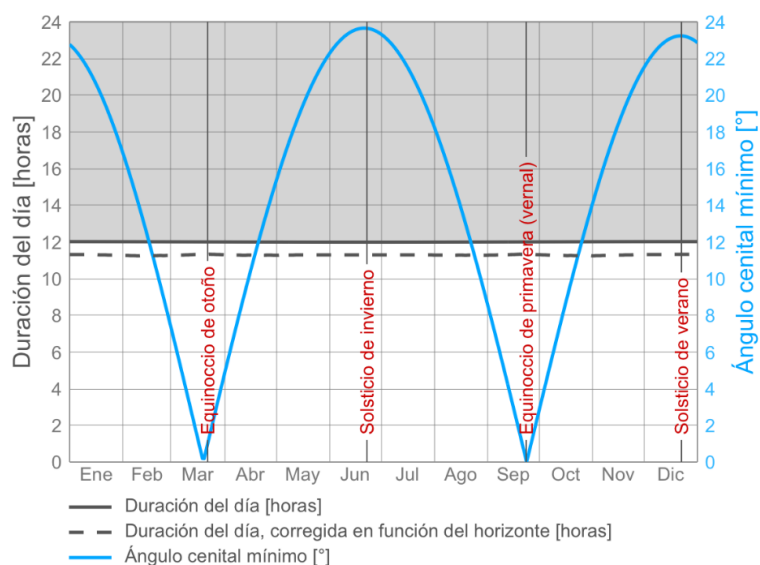


Figura 14: Duración del Día y Ángulo Cenital Solar

Nota: Esta figura muestra la duración de horas en el día y su ángulo cenital.

Fuente: (Solargis Prospect, n.d.)

Tabla 11: Hora de inicio de 17 de agosto del 2024.

Ítem	Información	Hora
1	Crepúsculo	5:53 am
2	Amanecer de hoy	6:14 am
3	Atardecer de hoy	6:20 pm
4	Ocaso	6:41 pm
5	Luz natural total	12 h 06 min.

Nota: Esta tabla muestra el inicio y fin solar del 17 de agosto del 2024.

Fuente: App Clima.

La figura 15 presenta la distribución horaria de la irradiación global horizontal (Wh/m²) recibida en una superficie horizontal a lo largo del año, proporcionando un panorama detallado de la disponibilidad de energía solar en el sitio de estudio. Cada celda de la matriz corresponde a la cantidad de energía solar (medida en Wh/m²) recibida en una hora específica del día, con los meses del año en las columnas y las horas del día en las filas. Los colores de las celdas indican la intensidad de la irradiación, donde los tonos más oscuros y rojizos representan niveles más altos de irradiación, mientras que los tonos más claros y verdosos indican niveles más bajos.

Se observa que los picos de irradiación se concentran generalmente entre las 9:00 y las 15:00 horas, coincidiendo con el periodo del día en el que el sol está más alto en el cielo. Estos picos son especialmente pronunciados durante los meses de verano (junio, julio y agosto), debido a la mayor altura del sol y la mayor duración del día en estas épocas. Este análisis es fundamental para la planificación y optimización de los sistemas fotovoltaicos, ya que permite identificar las horas y meses con mayor potencial de generación de energía solar, lo cual es crucial para maximizar la eficiencia y el rendimiento de las instalaciones fotovoltaico.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6-7	24	17	23	38	45	38	32	37	58	81	78	47
7-8	188	163	179	212	219	213	212	234	272	289	276	227
8-9	396	369	386	420	414	410	421	463	505	522	502	443
9-10	586	558	576	609	576	572	597	659	700	720	688	633
10-11	736	711	711	742	694	694	724	806	831	847	819	756
11-12	816	798	779	787	745	745	778	865	884	872	860	798
12-13	797	762	779	730	712	725	776	850	868	807	782	761
13-14	700	664	697	611	632	641	706	773	759	656	627	639
14-15	585	564	518	468	509	548	604	652	576	482	486	516
15-16	460	444	388	351	391	424	483	504	439	345	349	393
16-17	298	295	260	238	247	278	321	328	274	208	207	245
17-18	133	140	122	98	93	106	136	137	99	62	65	90
18-19	5	14	5	0	-	1	4	3	-	-	-	0
19-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22-23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suma	5723	5497	5424	5305	5276	5396	5794	6313	6265	5891	5738	5549

Figura 15: Irradiación Global Horizontal Wh/m²

Nota: Esta figura muestra el promedio de irradiación global horizontal en el año 2023.

Fuente: (Solargis Prospect, n.d.)

Las variaciones diarias de tres tipos de irradiación solar para el mes de agosto se presentan en la figura 16, que muestra la Irradiación Global Horizontal (GHI), la Irradiación Directa Normal (DNI) y la Irradiación Difusa Horizontal (DIF). En el eje vertical se representa

la irradiancia en W/m^2 , mientras que en el eje horizontal se indican las horas del día. La curva azul oscura corresponde a la GHI, que representa la suma de la irradiación directa y difusa recibida en una superficie horizontal. La curva amarilla refleja la DNI, que mide la irradiancia solar que llega directamente desde el sol, sin haber sido dispersada por la atmósfera. Finalmente, la curva azul clara representa la DIF, que captura la irradiación solar dispersada en la atmósfera y recibida de manera difusa en una superficie horizontal.

Estas curvas permiten analizar detalladamente cómo varía la disponibilidad de energía solar a lo largo del día, destacando un pico de irradiancia generalmente alrededor del mediodía, cuando el sol alcanza su máxima altura en el cielo. La distribución de los diferentes componentes de la irradiación solar en el sitio de estudio proporciona información crucial para entender el comportamiento de la energía solar disponible y para la optimización del diseño y orientación de los sistemas fotovoltaicos en este contexto.

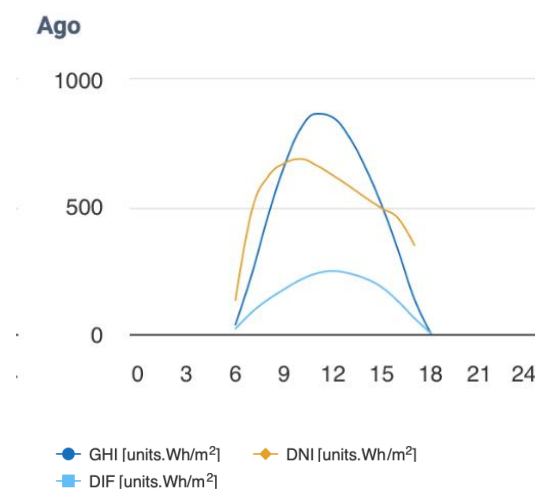


Figura 16: Irradiación global horizontal

Nota: Esta figura muestra la irradiación global horizontal en el mes de agosto del 2023.

Fuente: (Solargis Prospect, n.d.)

La figura 17 muestra los datos de irradiancia global horizontal (GHI) para el 17 de agosto de 2024, ilustrando cómo la energía solar, medida en W/m^2 , se distribuye a lo largo de las horas del día. La gráfica indica un incremento de la irradiancia a medida que el sol asciende, alcanzando su punto máximo cerca del mediodía, cuando el sol se encuentra en su posición más alta en el cielo, con un valor cercano a los $1000 W/m^2$. Posteriormente, la irradiancia disminuye conforme el sol desciende hacia el horizonte, reduciéndose casi a cero al final del día.

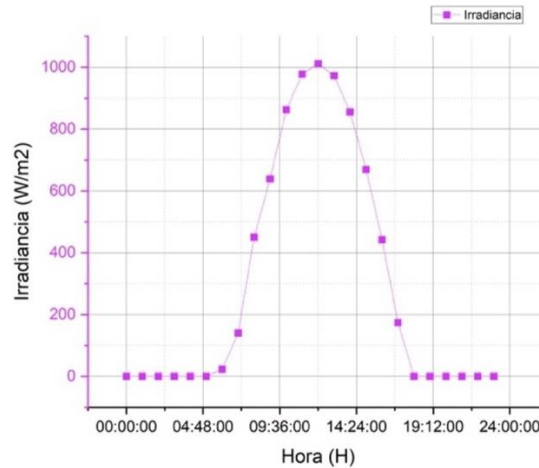


Figura 17: Datos de Irradiancia Global Horizontal – 17 de agosto del 2024
 Nota: Esta figura muestra la variación de irradiancia del 17 de agosto del 2024.
 Fuente: (DATOS_HISTORICOS_REMMAQ, n.d.)

Estos datos son fundamentales para evaluar el rendimiento potencial de los paneles fotovoltaico durante esa jornada específica, permitiendo prever la cantidad de energía solar que se puede capturar y utilizar. La información proporcionada es crucial para la optimización de la instalación y el uso de sistemas fotovoltaicos en la región, al ofrecer una comprensión detallada del comportamiento de la irradiancia en un día representativo del año.

Tabla 12: Datos de Irradiancia Global Horizontal

Tumbaco	Hora	Irradiancia
	h	W/m2
17/08/2024	0:00:00	0
17/08/2024	1:00:00	0
17/08/2024	2:00:00	0
17/08/2024	3:00:00	0
17/08/2024	4:00:00	0
17/08/2024	5:00:00	0
17/08/2024	6:00:00	23
17/08/2024	7:00:00	140,4
17/08/2024	8:00:00	450,6
17/08/2024	9:00:00	639,1
17/08/2024	10:00:00	862,9
17/08/2024	11:00:00	977,5
17/08/2024	12:00:00	1011,4
17/08/2024	13:00:00	972,8
17/08/2024	14:00:00	855,3

17/08/2024	15:00:00	669,5
17/08/2024	16:00:00	442,1
17/08/2024	17:00:00	174,2
17/08/2024	18:00:00	0
17/08/2024	19:00:00	0
17/08/2024	20:00:00	0
17/08/2024	21:00:00	0
17/08/2024	22:00:00	0
17/08/2024	23:00:00	0

Nota: Esta tabla muestra el inicio y fin solar del 17 de agosto del 2024.
Fuente: (DATOS_HISTORICOS_REMMAQ, n.d.)

3.4. Superficie no convencional.

Para maximizar la captación de energía solar, los paneles fotovoltaico-flexibles se instalan en configuraciones adaptadas a la forma de la superficie disponible. Estas configuraciones varían según la geometría de la estructura sobre la que se instalan los paneles, permitiendo una integración óptima en diversos contextos arquitectónicos y estructurales.

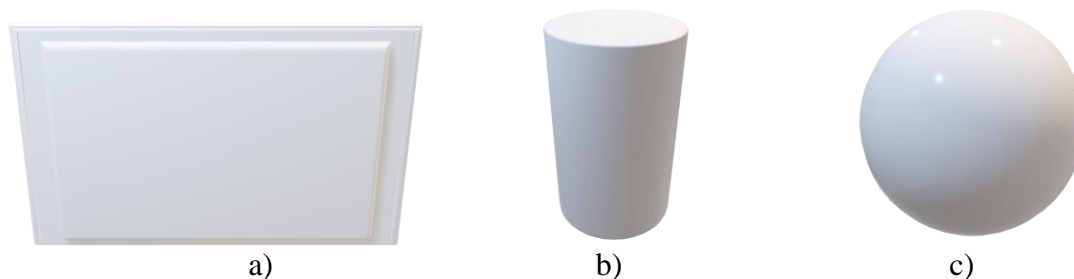


Figura 18: Formas de superficie aplicadas.

Nota: Esta figura muestra a) superficie plana, b) superficie cilíndrica y c) superficie circular.
Fuente: Propia.

En una superficie plana, los paneles se colocan horizontalmente, aprovechando la estabilidad y uniformidad de la captación solar. Las condiciones de instalación se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: *Condiciones de implementación – superficie plana.*

Ítem	Referencia	Valor	Observación
1	Dirección	Norte	Estable en prueba
2	Inclinación	0 °	Estable en prueba
3	Temperatura	10,9 °C	Inicio de pruebas

Nota: Esta tabla muestra los valores aplicados a la superficie plana. Fuente: Propia.

En una superficie cilíndrica, los paneles se envuelven alrededor de la estructura, bajo las condiciones descritas en la tabla 14, lo que permite captar luz solar desde diferentes ángulos a lo largo del día.

Tabla 14: *Condiciones de implementación – superficie cilíndrica.*

Ítem	Referencia	Valor	Observación
1	Dirección	Norte	Estable en prueba
2	Diámetro	30 °	Limitado por estructura
3	Temperatura	10,9 °C	Inicio de pruebas

Nota: Esta tabla muestra los valores aplicados a la superficie cilíndrica. Fuente: Propia.

Finalmente, en una superficie esférica, el panel se distribuye de manera uniforme, bajo las condiciones de implementación, para facilitar la captación solar en la dirección este - oeste, optimizando así la recolección de energía durante todo el día.

Tabla 15: *Condiciones de implementación – superficie esférica.*

Ítem	Referencia	Valor	Observación
1	Dirección	Este - Oeste	Estable en prueba
2	Curvatura	15 °	Limitado por estructura
3	Temperatura	10,9 °C	Inicio de pruebas

Nota: Esta tabla muestra los valores aplicados a la superficie esférica. Fuente: Propia.

Esta versatilidad en la instalación es fundamental para aprovechar al máximo la tecnología de paneles fotovoltaico-flexibles en entornos con geometrías no convencionales.

3.5. Condiciones Ambientales

El análisis de las condiciones ambientales específicas, como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, es fundamental para evaluar el impacto que estos factores tienen

sobre el rendimiento de los paneles fotovoltaico. Las variaciones en la temperatura pueden afectar significativamente la eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos, ya que un aumento en la temperatura generalmente reduce la eficiencia del material semiconductor. La variación de la temperatura ambiental que se muestra en la figura 19.

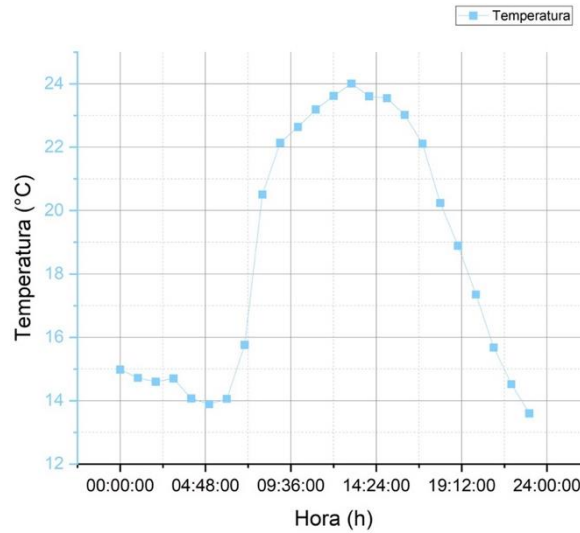


Figura 19: Temperatura medio ambiente - sitio

Nota: Esta figura muestra la variación de temperatura medio ambiente del 17 de agosto del 2024.

Fuente: Propia

Por otro lado, la velocidad del viento juega un papel crucial en la disipación del calor acumulado en los paneles, favoreciendo el enfriamiento pasivo y, por lo tanto, optimizando su rendimiento. Se muestra variación de la velocidad del viento en la figura 23.

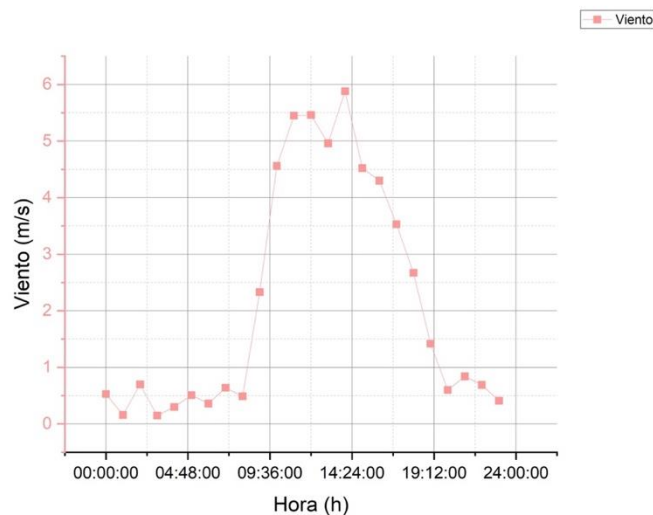


Figura 20: Velocidad del viento - sitio

Nota: Esta figura muestra la variación de velocidad de viento por hora del 17 de agosto del 2024.

Fuente: Propia

La humedad también puede influir en la generación de energía solar, especialmente en regiones donde la condensación o la acumulación de agua pueden afectar la transparencia de las cubiertas de los paneles o aumentar la probabilidad de corrosión.

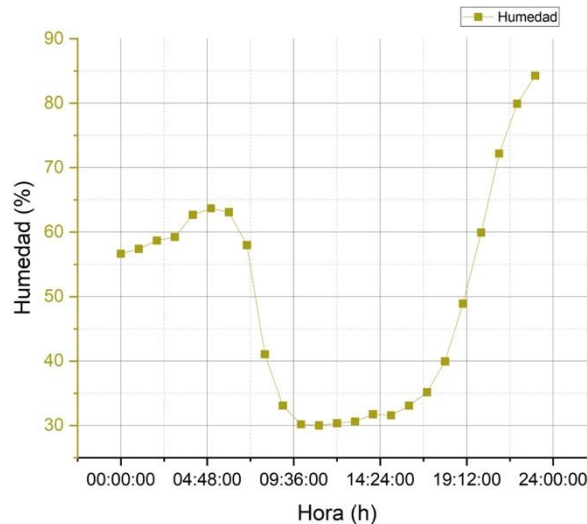


Figura 21: *Humedad relativa - sitio*

Nota: Esta figura muestra la variación de humedad en porcentaje por hora del 17 de agosto del 2024.

Fuente: Propia.

Por lo tanto, una comprensión detallada de estas variables ambientales es esencial para la planificación, instalación y operación eficiente de los sistemas fotovoltaicos, asegurando que se maximice la generación de energía en diversas condiciones climáticas.

3.5. Materiales y Equipos:

3.5.1. Módulos Fotovoltaicos Flexibles

Para la selección de módulos fotovoltaicos con las mejores características de eficiencia y resistencia, se consideró la capacidad de los paneles para adaptarse a una curvatura de superficie, además de factores clave como la irradiación solar y las condiciones climáticas locales. Con el objetivo de maximizar la generación de energía en espacios reducidos, se decidió utilizar los paneles fotovoltaico-flexibles “CIGS de 100 W” de la marca BougeRV, conocidos por su alta eficiencia y capacidad para operar en superficies no convencionales, lo que los convierte en una opción adecuada para las necesidades específicas del proyecto.



Figura 22: Panel solar BougerRV 100W CIGS

Nota: Esta figura muestra el control de superficie, para no variación durante la prueba.

Fuente: Amazon.com

Tabla 16: Ficha técnica panel solar flexible.

Característica	Especificación técnica
Potencia Máxima (P_{max})	100W \pm 5%
Eficiencia de las Células Fotovoltaico	17%
Voltaje de Potencia Máxima (V_{mp})	24V \pm 5%
Corriente de Potencia Máxima (I_{mp})	4,21A \pm 5%
Voltaje de Circuito Abierto (v_{oc})	30,5V \pm 5%
Corriente de Cortocircuito (I_{sc})	4,71A \pm 5%
Voltaje Máximo del Sistema	1000V DC
Rango de Temperatura de Operación	-40°C ~ +85°C
Coefficiente de Temperatura de P_{max}	-0,38%/°C
Coefficiente de Temperatura de V_{oc}	-0,28%/°C
Coefficiente de Temperatura de I_{sc}	-0,008%/°C
Dimensiones	1096mm x 689mm x 1,5mm
Peso	3,24 lbs (1,47 kg)

Nota. Esta tabla muestra la información técnicos del panel solar flexible BougeRV de 100W.

Fuente: (BougeRV, 2020)

3.5.2. Maximum Power Point Tracker – MPPT (Seguidor del punto de máxima potencia)

Con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico y facilitar su monitoreo, se ha integrado un controlador de carga SmartSolar MPPT100/30 de Victron Energy. Este dispositivo, gracias a sus capacidades de adquisición de datos y su algoritmo de MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia), nos permitirá maximizar la producción de energía y garantizar una larga vida útil de las baterías.



Figura 23: Controlador MPPT 100/30

Nota. Esta figura muestra el controlador de carga SmartSolar MPPT 100/30.
Fuente: Victron

Tabla 17: Ficha técnica - MPPT

Característica	Especificación técnica
Voltaje de la batería	Selección automática 12/24V
Corriente de carga nominal	30A
Potencia FV nominal 12V	440W
Potencia FV nominal 24V	880W
Voltaje máximo circuito abierto FV	100V
Corriente máxima de cortocircuito FV	35A
Eficiencia máxima	98%
Autoconsumo	12V: 30mA, 24V: 20mA
Voltaje de carga "absorción"	Valores predeterminados: 14.4V/28.8V (ajustable)
Voltaje de carga "flotación"	Valores predeterminados: 13.8V/27.6V (ajustable)
Algoritmo de carga	Adaptativo multifase
Compensación de temperatura	-16mV/°C
Protecciones	Polaridad inversa FV, cortocircuito de salida, sobre temperatura
Temperatura de trabajo	De -30°C a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C)
Humedad	95%, sin condensación
Grado de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)
Peso	1.3kg
Dimensiones (al x an x p)	130 x 186 x 70mm
Normativas	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2

Datos guardados	Tensión, corriente y temperatura de la batería, además de corriente de salida de carga, tensión FV y corriente FV.
Número de días durante los que se guardan los datos de tendencias	46

Nota. Esta tabla muestra la información técnicos del SmartSolar MPPT 100/30.
Fuente:(Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-100-30-&-100-50-ES, n.d.)

3.6. Instalación de los Paneles Fotovoltaico Flexibles

La implantación de los paneles fotovoltaico-flexibles en este proyecto se realiza sobre tres tipos de superficies clave: horizontal, cilíndrica y curva. Este proceso es fundamental para evaluar el rendimiento de los paneles en diferentes configuraciones estructurales, asegurando que se adapten y funcionen de manera eficiente en cada uno de estos entornos no convencionales.

3.6.1. Superficie Horizontal

En la **superficie horizontal**, los paneles fotovoltaicos se fijan utilizando adhesivos y clips diseñados para garantizar una sujeción segura y estable. Esta instalación permite maximizar la captación solar en techos planos o superficies niveladas. La figura 24 muestra la ubicación del panel sobre una superficie horizontal, destacando la uniformidad y estabilidad de la instalación.



Figura 24: *Superficie Plana - Aplicada*

Nota: Esta figura muestra el control de superficie, para no variación durante la prueba.
Fuente: Propia.

3.6.2. Superficie Cilíndrica

Para la **superficie cilíndrica**, se realiza una fijación envolvente, donde el panel solar flexible se adhieren alrededor de la curvatura del cilindro. Esta implantación asegura que el panel pueda captar la luz solar desde múltiples ángulos a lo largo del día. La figura 25 ilustra cómo el panel se adapta y se fija a una superficie cilíndrica, demostrando la versatilidad de la tecnología en entornos con geometrías complejas.

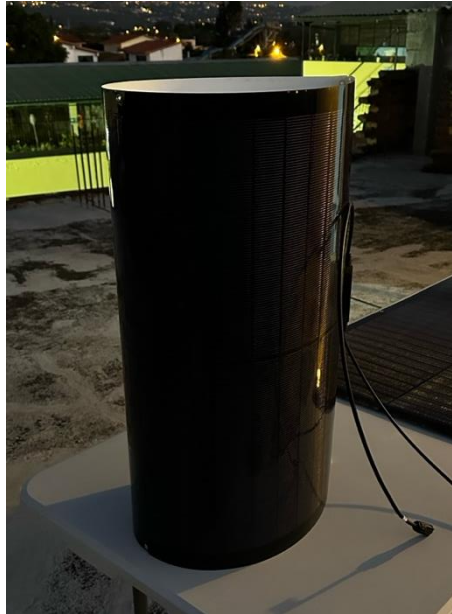


Figura 25: Superficie Cilindro - Aplicada

Nota: Esta figura muestra el control de superficie, para no variación durante la prueba.

Fuente: Propia

3.6.3. Superficie Curva

En cuanto a la **superficie curva**, el panel se coloca siguiendo la inclinación natural de la estructura, lo que permite una captación solar optimizada a lo largo del día. Esta instalación es particularmente útil en techos inclinados o superficies arquitectónicas con formas no planas. La figura 26 muestra la implantación del panel en una superficie curva, resaltando la capacidad de los paneles para integrarse en formas irregulares mientras se asegura una fijación sólida y duradera.



Figura 26: *Superficie Esférica - Aplicada*

Nota: Esta figura muestra el control de superficie, para no variación durante la prueba.
Fuente: Propia.

3.7. Procedimiento de Monitoreo:

Se ha implementado un monitoreo exhaustivo para la recolección de datos, con mediciones realizadas a intervalos regulares a lo largo del día, ajustados de manera horaria según las condiciones específicas del sitio donde se lleva a cabo el estudio. Este enfoque permite capturar con precisión las variaciones ambientales y evaluar su impacto en el rendimiento de los paneles fotovoltaico, garantizando que los datos recopilados reflejen fielmente el comportamiento del sistema en el entorno particular del proyecto. En la tabla 18 se detallan las horas de inicio, los intervalos y el tiempo de finalización de la toma de datos, mientras que en la tabla 19 se presentan las condiciones medioambientales registradas durante el proceso de monitoreo.

Tabla 18: *Intervalo de recolección de datos*

Ítem	Valor	Observación
Amanecer	06:15 h	Hora de Inicio
Atardecer	18:15 h	Hora de Fin
Intervalo medición	30 min	Recolección dato

Nota: Esta tabla muestra los horarios establecidos de inicio, fin e intervalo de recolección de datos en el sitio.
Fuente: Propia.

Tabla 19: *Situación medio ambiental*

Categoría	Datos
Nombre del Sitio	TUMBACO
Ubicación (Coordenadas GPS)	-0.211346, -78.404211
Tipo de Superficie	Plano - Cilindro - Curvo
Descripción General del Sitio	Valle de Tumbaco - 2328 msnm

Fecha y Hora de la Observación	17 de agosto del 2024 - 06:15
Tipo de Entorno	Elevado - libre obstáculos
Proximidad a Fuentes de Sombra	Despejado
Presencia de Contaminantes en el Aire	No
Descripción del Entorno Inmediato	Edificios de baja altura
Temperatura Ambiente (°C)	24
Humedad Relativa (%)	51
Velocidad del Viento (m/s)	1,39
Dirección del Viento	SO
Condiciones Climáticas	Despejado
Presencia de Sombras Parciales	No
Visibilidad (Km)	27
Orientación del Panel (Azimut)	0
Ángulo de Inclinación del Panel	0
Método de Montaje	Superficial
Condiciones del Panel Solar - Limpieza	Limpio
Condiciones del Panel Solar - Estado General	Bueno

Nota: Esta tabla muestra los valores iniciales de prueba de medio ambiente.
Fuente: Propia.

Desarrollo de pruebas iniciales de voltaje en circuito abierto (V_{oc}), y su intensidad de corto circuito (I_{sc}) del panel fotovoltaico con una irradiancia de 1086 W/m^2 , los valores iniciales presentes en la tabla 20.

Tabla 20: *Parámetros eléctricos panel fotovoltaico*

Ítem	Valor	Unidad
V_{oc}	28,2	Voltios (V)
I_{sc}	4,73	Amperios (A)

Nota: Esta tabla muestra los valores iniciales de prueba del panel fotovoltaico.
Fuente: Propia.

Tabla 21: *Variables - Unidad de medida*

Variable	Unidad Medida
Temperatura	Grados Centígrados °C
Velocidad Viento	Metros por segundo (m/s)
Humedad	Porcentaje humedad (%)
Irradiancia	Vatio por metro cuadrado (W/ m^2)
Voltaje	Voltio (V)

Intensidad	Amperio (A)
Potencia	Vatio (W)

Nota: Esta tabla muestra las unidades por cada variable relacionada.
Fuente: Propia.

La recolección de datos se llevó a cabo durante todo el período de estudio, enfocándose en capturar las principales variables ambientales que influyen en el rendimiento de los paneles fotovoltaico. Los datos recogidos se presentan de manera organizada en tablas para facilitar su análisis. En la tabla 21 se muestra la temperatura ambiental, la velocidad del viento y la humedad relativa, registradas en intervalos regulares a lo largo del día. Estas variables son cruciales, ya que la temperatura afecta directamente la eficiencia de los paneles, mientras que el viento contribuye al enfriamiento pasivo, y la humedad puede influir en la claridad del aire y la posible acumulación de condensación en las superficies de los paneles.

Tabla 22: *Datos Medio Ambiente - Sitio*

Ítem	Hora	Temp_Real	Viento_Medida	Humedad
1	06:15	8	1,39	69
2	06:45	8	1,67	68
3	07:15	9	1,94	66
4	07:45	11	1,94	62
5	08:15	13	1,94	55
6	08:45	15	1,94	48
7	09:15	17	1,94	46
8	09:45	18	2,22	44
9	10:15	20	2,50	43
10	10:45	21	2,78	41
11	11:15	22	2,78	39
12	11:45	22	2,78	37
13	12:15	23	2,50	37
14	12:45	23	2,78	35
15	13:15	24	2,78	34
16	13:45	24	2,78	34
17	14:15	24	3,06	34
18	14:45	24	3,06	35
19	15:15	24	3,33	34
20	15:45	23	3,33	35
21	16:15	23	3,06	35

22	16:45	22	2,78	36
23	17:15	21	2,22	40
24	17:45	19	2,22	40
25	18:15	17	2,5	40

Nota: Esta tabla muestra los valores de las variables ambientales.

Fuente: Propia.

3.7.1. Superficie Horizontal

La recolección de datos de las principales variables que afectan el rendimiento de los paneles fotovoltaico en diferentes configuraciones. Los datos se han recopilado para proporcionar una visión detallada del comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación. En las tablas se presentan las mediciones clave, incluyendo la irradiancia solar, el voltaje, la intensidad, la potencia generada y la temperatura en el panel, todas ellas fundamentales para evaluar la eficiencia del sistema fotovoltaico.

En la tabla 22 se detallan los resultados obtenidos para el caso de estudio en una configuración horizontal, donde los paneles se instalaron sobre una superficie plana. Este caso permite evaluar cómo las condiciones ambientales y la disposición horizontal influyen en la captación de energía solar.

Tabla 23: Parámetros Eléctricos - Panel Horizontal

Ítem	Hora	Irradiancia	Temp_	Voltaje_P	Intensidad_Pa	Potencia_P
			Panel	anel	nel	anel
1	06:15	0	14,5	16,5	0	0
2	06:45	0	14,5	26,17	0	0
3	07:15	59	14,3	25,52	0,5	12,76
4	07:45	175	15,5	23,66	1,1	26,026
5	08:15	429	19,3	22,99	1,7	39,083
6	08:45	559	25,9	23,11	2,3	53,153
7	09:15	670	26,9	22,04	2,8	61,712
8	09:45	783	29,8	23,48	3,2	75,136
9	10:15	865	30	21,77	3,9	84,903
10	10:45	924	28,8	22,79	3,9	88,881
11	11:15	972	32,1	22,27	4,2	93,534
12	11:45	993	36,6	22,46	4,2	94,332
13	12:15	1006	36,6	22,35	4,3	96,105
14	12:45	1007	37,1	22,54	4,2	94,668
15	13:15	993	36,1	22,5	4	90
16	13:45	957	34,5	22,91	3,9	89,349

17	14:15	891	32,3	23,36	3,6	84,096
18	14:45	191	26,4	21,98	0,8	17,584
19	15:15	131	24,9	20,89	0,5	10,445
20	15:45	633	29,1	21,82	2,5	54,55
21	16:15	113	25	18,77	0,5	9,385
22	16:45	198	27,8	22,27	1,3	28,951
23	17:15	61	25,4	17,98	0,7	12,586
24	17:45	0	21,7	22,79	0	0
25	18:15	0	14,5	16,5	0	0

Nota: Esta tabla muestra los valores de las variables eléctricas recolectadas.

Fuente: Propia.

3.7.2. Superficie Cilíndrica

Por otro lado, la tabla 23 presenta los datos correspondientes al caso de estudio con paneles instalados en una superficie cilíndrica. Esta configuración es crucial para entender cómo la forma curvada afecta la captación de luz solar desde diferentes ángulos y, en consecuencia, el rendimiento del panel en términos de voltaje, intensidad y potencia generada (tabla 24). Estos análisis comparativos proporcionan información valiosa para optimizar la instalación de paneles fotovoltaico en diversas superficies y verificar la eficiencia de producción de energía.

Tabla 24: Datos de Irradiancia circundante

Ítem	Hora	DERECHA		IZQUIERDA		CENTRO	
		Irradiancia	Temp_ Panel	Irradiancia	Temp_ Panel	Irradiancia	Temp_ Panel
1	06:15	0	14,2	0	14,2	0	14,2
2	06:45	398	15,7	0	14,2	0	14,8
3	07:15	682	20,2	0	15,7	0	15
4	07:45	721	19,7	62	17,7	56	18,4
5	08:15	784	26,2	81	22,2	63	24,6
6	08:45	777	31,6	91	28,5	97	27,3
7	09:15	713	32,8	89	31,1	99	30,2
8	09:45	605	30,4	96	28,5	107	28,3
9	10:15	489	30	90	28,3	118	27,9
10	10:45	406	27,8	95	26,7	102	26,4
11	11:15	145	28,6	124	26,7	122	26,7
12	11:45	139	30,6	102	30,2	113	29,8
13	12:15	130	33,3	125	32,3	128	31,6

14	12:45	142	32,8	204	30,7	141	30,6
15	13:15	138	30,4	296	29,7	145	29,7
16	13:45	120	30,9	499	31,1	140	29,3
17	14:15	108	26,7	510	28,6	150	27,4
18	14:45	0	24,9	0	24,9	0	24,9
19	15:15	0	24,5	115	24,5	0	24,3
20	15:45	81	27,8	841	31,2	93	29,8
21	16:15	0	24,5	514	25,2	62	25
22	16:45	62	25,4	833	26,7	56	26,2
23	17:15	0	25	707	26,7	0	26,2
24	17:45	0	22,4	0	22,4	0	22,3
25	18:15	0	14,2	0	14,2	0	14,2

Nota: Esta tabla muestra los valores de irradiancia sobre el panel en tres posiciones.
Fuente: Propia.

Tabla 25: *Parámetros Eléctricos - Panel Cilíndrica.*

Ítem	Hora	Voltaje_Panel	Intensidad_Panel	Potencia_Panel
1	06:15	13,31	0	0
2	06:45	26,29	0	0
3	07:15	20,42	0,2	4,084
4	07:45	18,89	0,2	3,778
5	08:15	19,21	0,3	5,763
6	08:45	22,38	0,3	6,714
7	09:15	18,75	0,4	7,5
8	09:45	18,6	0,4	7,44
9	10:15	23,48	0,3	7,044
10	10:45	21,08	0,4	8,432
11	11:15	21	0,5	10,5
12	11:45	23,31	0,5	11,655
13	12:15	22,35	0,6	13,41
14	12:45	23,14	0,5	11,57
15	13:15	23,96	0,5	11,98
16	13:45	24,1	0,5	12,05
17	14:15	23,34	0,5	11,67
18	14:45	23,46	0,1	2,346
19	15:15	16,34	0,1	1,634
20	15:45	17,9	0,4	7,16
21	16:15	13,45	0,1	1,345
22	16:45	17,24	0,3	5,172

23	17:15	15,55	0,2	3,11
24	17:45	14,19	0	0
25	18:15	13,31	0	0

Nota: Esta tabla muestra los valores de las variables eléctricas recolectadas.
Fuente: Propia.

3.7.3. Superficie Curva

Finalmente, en la tabla 25 se muestran los resultados para el caso de estudio con paneles instalados en una superficie curva. Esta configuración es particularmente importante para evaluar cómo la inclinación y curvatura de la superficie influyen en la eficiencia de captación solar a lo largo del día.

Tabla 26: *Parametros Electricos - Panel Curvo*

Ítem	Hora	Irradiancia	Temp_P	Voltaje_P	Intensidad_Pa	Potencia_P
			anel	anel	nel	anel
1	06:15	0	14,2	13,31	0	0
2	06:45	398	15,7	26,29	0,5	13,145
3	07:15	682	20,2	20,42	0,5	10,21
4	07:45	721	19,7	18,89	1,1	20,779
5	08:15	784	26,2	19,21	1,7	32,657
6	08:45	777	31,6	23,11	2,3	53,153
7	09:15	713	32,8	22,04	2,8	61,712
8	09:45	783	29,8	23,48	3,2	75,136
9	10:15	865	30	21,77	3,9	84,903
10	10:45	924	28,8	22,79	3,9	88,881
11	11:15	972	32,1	22,27	4,2	93,534
12	11:45	993	36,6	22,46	4,2	94,332
13	12:15	1006	36,6	22,35	4,3	96,105
14	12:45	1007	37,1	22,54	4,2	94,668
15	13:15	993	36,1	22,5	4	90
16	13:45	957	34,5	22,91	3,9	89,349
17	14:15	891	32,3	23,36	3,6	84,096
18	14:45	191	26,4	21,98	0,8	17,584
19	15:15	131	24,9	20,89	0,5	10,445
20	15:45	633	29,1	21,82	2,5	54,55
21	16:15	113	25	18,77	0,5	9,385
22	16:45	198	27,8	22,27	1,3	28,951
23	17:15	61	25,4	17,98	0,7	12,586
24	17:45	50	21,7	22,79	0,5	11,395

25	18:15	0	14,5	16,5	0	0
----	-------	---	------	------	---	---

Nota: Esta tabla muestra los valores de las variables eléctricas recolectadas.

Fuente: Propia.

La comparación de estos tres casos de estudio permite obtener una comprensión integral de cómo diferentes geometrías de superficie afectan el rendimiento de los paneles fotovoltaico, lo que es esencial para optimizar su instalación en diversas aplicaciones arquitectónicas y verificar la eficiencia de producción de energía.

3.8. Análisis de Datos y Validación

3.8.1. Modelo de Hipótesis

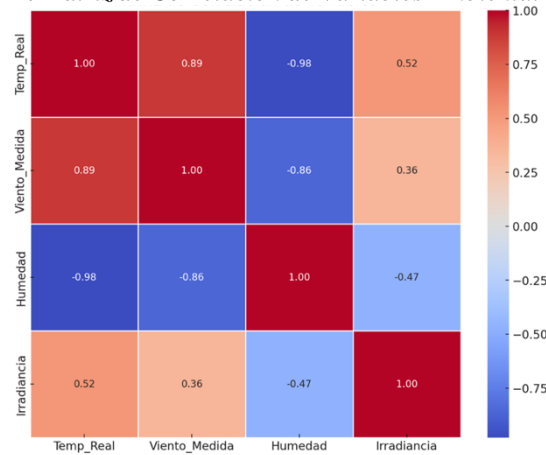
La hipótesis del estudio sostiene que los paneles fotovoltaicos flexibles instalados en superficies no convencionales, cuando se optimizan las condiciones de instalación, presentan un rendimiento energético comparable o superior a los paneles rígidos. Esta hipótesis será validada mediante pruebas de campo en el sitio seleccionado y con un análisis correlacional de las variables ambientales y su impacto en el rendimiento del sistema.

3.8.2. Análisis Ambiental

Irradiancia: Factor Clave para la Generación Fotovoltaica

La irradiancia representa la cantidad de energía solar que llega a la superficie de los paneles, y es la variable más crucial en la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos. Esta variable está correlacionada con otras variables como la Temperatura Real, la Velocidad del Viento y la Humedad, y estas relaciones pueden tener implicaciones directas en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. A continuación, se describen las correlaciones que pueden afectar la generación de electricidad en paneles fotovoltaicos flexibles:

Tabla 27: Matriz de Correlación de Variables Ambiental



Nota: Esta figura muestra la correlación principal de irradiancia y variables ambientales.
Fuente: Propia.

Correlación de la Irradiancia con Otras Variables

Irradiancia y Temp_Real (Temperatura Real) (+0.52)

Correlación Positiva Moderada: Existe una correlación positiva moderada entre la irradiancia y la temperatura. Esto significa que cuando la irradiancia aumenta, la temperatura también tiende a subir. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque una mayor irradiancia es beneficiosa para la generación de electricidad, el aumento de la temperatura puede reducir la eficiencia de los paneles solares. Los paneles fotovoltaicos tienden a ser menos eficientes a temperaturas más altas, lo que significa que una alta irradiancia acompañada de altas temperaturas podría no ser ideal.

Irradiancia y Viento_Medida (Velocidad del Viento) (+0.36)

Correlación Positiva Débil: Existe una correlación positiva débil entre la irradiancia y la velocidad del viento. Esto indica que, en situaciones de mayor irradiancia, podría haber un leve incremento en la velocidad del viento. Aunque la correlación es baja, el viento puede desempeñar un papel beneficioso al enfriar los paneles solares. Este enfriamiento natural puede contrarrestar parcialmente los efectos negativos de las altas temperaturas, ayudando a mantener o incluso mejorar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en condiciones de alta irradiancia.

Irradiancia y Humedad (-0.47)

Correlación Negativa Moderada: La irradiancia tiene una correlación negativa moderada con la humedad. Esto sugiere que, en condiciones de alta humedad, la irradiancia tiende a ser menor. Esto puede deberse a la presencia de nubes o humedad en el aire que bloquean o difunden la luz solar, reduciendo así la cantidad de energía solar disponible para

los paneles. En general, una menor irradiancia debido a una mayor humedad podría resultar en una menor generación de electricidad por los sistemas fotovoltaicos.

Implicaciones para la Generación Fotovoltaica

Alta Irradiancia: Es crucial para maximizar la generación de electricidad. Sin embargo, si esta alta irradiancia se acompaña de altas temperaturas, la eficiencia de los paneles podría verse comprometida. Es aquí donde la velocidad del viento puede jugar un papel positivo, ayudando a enfriar los paneles.

Alta Velocidad del Viento: Aunque no directamente relacionada con la generación de electricidad, el viento puede mejorar la eficiencia del sistema al reducir la temperatura de los paneles en condiciones de alta irradiancia.

Alta Humedad: Puede reducir la cantidad de irradiancia disponible debido a la dispersión o absorción de la luz solar, lo que afecta negativamente la generación de electricidad.

3.8.3. Análisis Eléctrico - Superficie Horizontal

El análisis de los datos recolectados durante un día típico de operación en una instalación de paneles fotovoltaicos montados de forma horizontal muestra una correlación significativa entre la irradiancia solar, la temperatura del panel y la potencia generada. La irradiancia, que representa la cantidad de energía solar que incide en la superficie de los paneles, es la variable más influyente en la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos instalados horizontalmente. A medida que la irradiancia aumenta desde las primeras horas del día, las demás variables, como la temperatura del panel, el voltaje, la intensidad y la potencia generada, se ven directamente afectadas.

Irradiancia: Factor Clave para la Generación Fotovoltaica

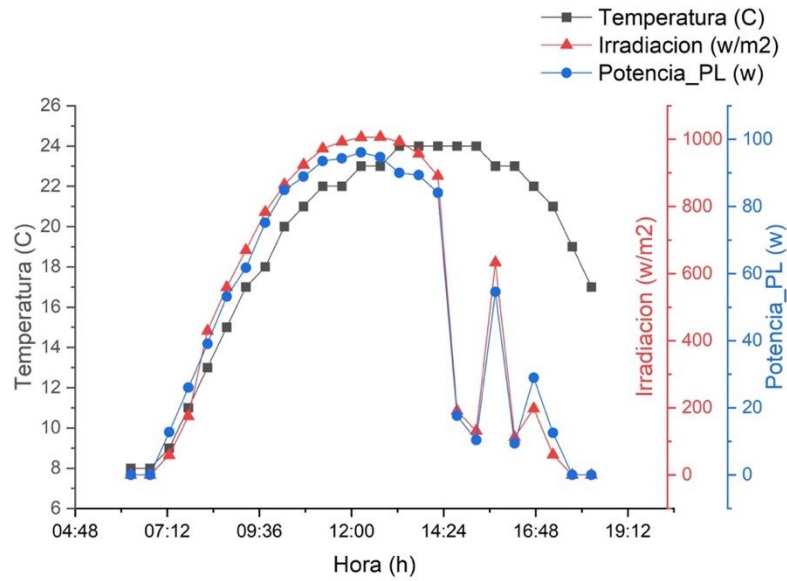


Figura 27: Generación de Potencia en función de irradiancia - Horizontal

Nota: Esta figura muestra la relación de variables temperatura, irradiancia y potencia en la configuración Horizontal.

Fuente: Propia.

La irradiancia solar alcanzó su valor máximo de 1006 W/m^2 a las 12:15 horas, lo que coincidió con el pico de temperatura del panel, registrado en $37,1^\circ\text{C}$ a las 12:45 horas, y un máximo de potencia generada de $94,668 \text{ W}$ en el mismo periodo. Estos datos confirman que la irradiancia no solo es el principal impulsor de la generación de energía en sistemas horizontales, sino que también afecta otros parámetros críticos del sistema.

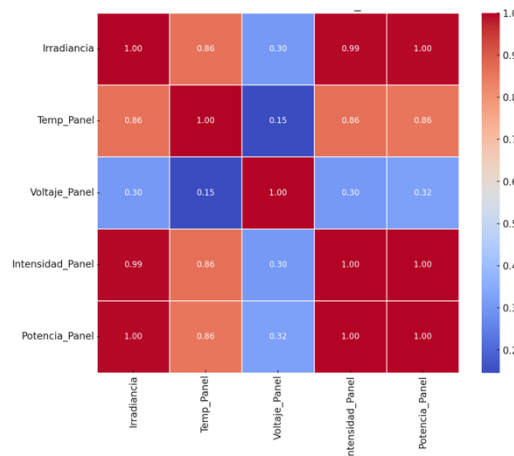


Figura 28: Matriz de Correlación de Variables Eléctrica – Horizontal.

Nota: Esta figura muestra la correlación principal de irradiancia y variables eléctricas.

Fuente: Propia.

Una correlación positiva fuerte (+0.86) se observa entre la irradiancia y la temperatura del panel. A medida que la irradiancia aumenta, la temperatura del panel también se

incrementa. Aunque una mayor irradiancia resulta en una mayor generación de corriente, la elevación de la temperatura puede reducir la eficiencia de los paneles, especialmente en instalaciones horizontales, ya que los paneles fotovoltaicos tienden a ser menos eficientes a temperaturas más altas. Esto sugiere que, en condiciones de alta irradiancia, el control térmico se convierte en un factor crítico para mantener un rendimiento óptimo en una disposición horizontal.

Por otro lado, la correlación entre irradiancia y voltaje del panel es negativa (-0.30), lo que indica que un aumento en la irradiancia, y por tanto en la temperatura, tiende a disminuir el voltaje del panel. Aunque esto puede parecer contradictorio, es una consecuencia del comportamiento intrínseco de los materiales semiconductores en los paneles solares, que disminuyen su voltaje de salida a temperaturas más altas. Esto destaca la necesidad de gestionar adecuadamente el voltaje en sistemas fotovoltaicos horizontales para evitar pérdidas significativas de eficiencia.

La intensidad de corriente generada por el panel muestra una correlación positiva muy fuerte con la irradiancia (+0.99), lo que confirma que la generación de corriente aumenta considerablemente con la irradiancia. Dado que la potencia es el producto del voltaje y la corriente, la irradiancia se convierte en un factor determinante en la producción de energía, con una correlación positiva extremadamente fuerte (+1.0) entre irradiancia y potencia en sistemas horizontales.

Implicaciones para la Generación Fotovoltaica

Las observaciones realizadas confirman que una alta irradiancia incrementa significativamente la potencia generada en paneles instalados horizontalmente, principalmente a través del aumento de la corriente en los paneles. Sin embargo, este beneficio puede verse contrarrestado por un aumento en la temperatura del panel, que reduce el voltaje y, en consecuencia, la eficiencia global del sistema. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias de gestión térmica para mitigar el impacto del calentamiento en los paneles en una disposición horizontal.

Además, aunque la irradiancia sea alta, la disminución del voltaje sugiere que es necesario un equilibrio cuidadoso para asegurar que la potencia generada sea óptima. Este equilibrio puede lograrse a través de un diseño de sistema mejorado y una gestión térmica eficiente, lo que permitirá maximizar la generación de energía en condiciones de alta irradiancia sin sacrificar la eficiencia debido a temperaturas elevadas.

3.8.4. Análisis Eléctrico - Superficie Cilíndrica

El análisis de los datos obtenidos revela la relación entre las principales variables que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico instalado en superficies cilíndricas, tales como la irradiancia, la temperatura del panel y la potencia generada. En el caso de los paneles flexibles de película fina instalados en superficies cilíndricas, estas variables interactúan de manera compleja debido a la geometría no convencional, lo que influye directamente en la eficiencia de la conversión de energía. El comportamiento de las variables en esta disposición cilíndrica destaca cómo la irradiancia impacta aspectos clave como la temperatura, el voltaje y la corriente del sistema.

Irradiancia: Principal Impulsor de la Generación de Potencia en Superficies Cilíndricas

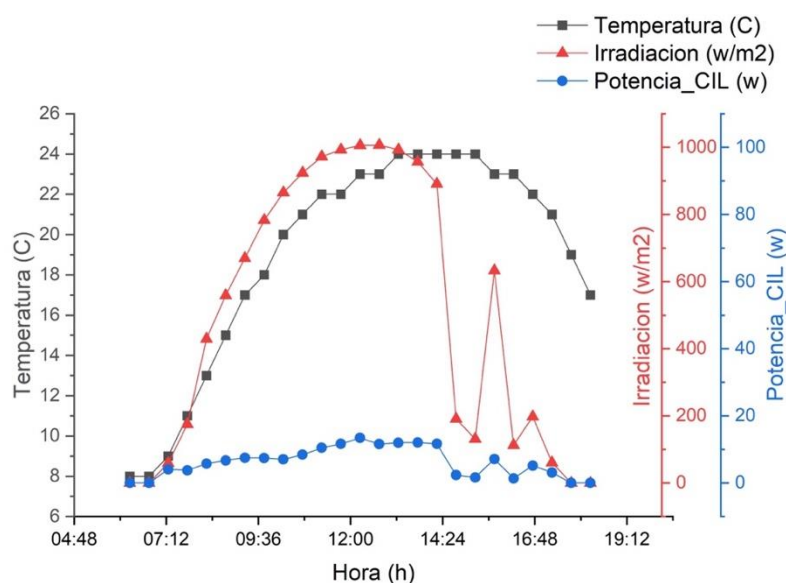


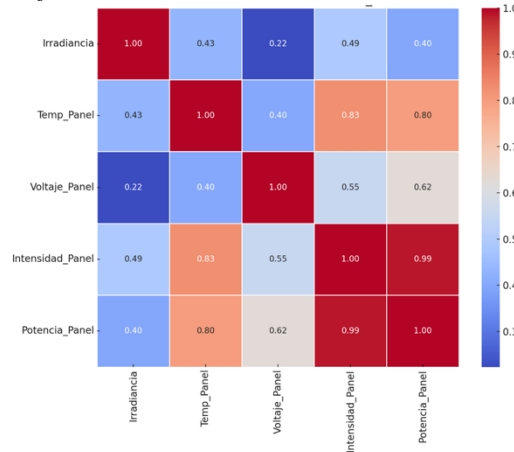
Figura 29: Generación de Potencia en función de irradiancia - Vertical

Nota: Esta figura muestra la relación de variables temperatura, irradiancia y potencia en la configuración Vertical. Fuente: Propia

La irradiancia solar, que representa la cantidad de energía que incide sobre la superficie del panel, es el principal factor que determina la cantidad de electricidad generada en superficies cilíndricas. Los datos muestran que la irradiancia comenzó en cero a las 06:15 horas, alcanzando un pico de 321,67 W/m² a las 08:15 horas y fluctuando a lo largo del día. Posteriormente, se observó un segundo pico menor a las 16:15 horas, con 317 W/m², antes de disminuir al final de la jornada. Estos valores demuestran cómo la irradiancia influye

directamente en la potencia generada en los paneles cilíndricos, con una correlación casi perfecta (+0.99) entre ambas variables.

Tabla 28: Matriz de Correlación de Variables Eléctrica – Vertical.



Nota: Esta figura muestra la correlación principal de irradiancia y variables eléctrica.
Fuente: Propia

Existe una correlación positiva leve (+0.43) entre la irradiancia y la temperatura del panel en superficies cilíndricas. A medida que la irradiancia aumenta, la temperatura del panel también se incrementa de manera significativa. En este tipo de geometría cilíndrica, la radiación solar incide en diferentes ángulos a lo largo del día, lo que genera un calentamiento menos uniforme, pero también provoca que las temperaturas más altas afecten la eficiencia de conversión. Si bien una mayor irradiancia es favorable para generar más electricidad, la elevación de la temperatura puede reducir el rendimiento en estas superficies cilíndricas debido al sobrecalentamiento.

En superficies cilíndricas, la correlación negativa entre la irradiancia y el voltaje del panel (-0.22) refleja que el aumento de la irradiancia y el calentamiento subsiguiente resultan en una disminución del voltaje. Dado que en una disposición cilíndrica la luz solar incide de manera desigual en diferentes partes del panel, esta variabilidad afecta el voltaje general del sistema, limitando la capacidad de generar potencia óptima si no se gestiona adecuadamente la temperatura del panel.

La intensidad del panel (corriente generada) muestra una correlación positiva moderada (+0.49) con la irradiancia. A medida que la irradiancia aumenta, la corriente generada por el panel también incrementa de manera baja. En paneles cilíndricos, la forma curva del panel permite una captación de luz parcial directa en algunos momentos del día, lo que incrementa

la generación de corriente, pero el diseño también introduce retos en la eficiencia de conversión en comparación con superficies planas.

Implicaciones para la Generación Fotovoltaica en Superficies Cilíndricas

En los paneles fotovoltaicos cilíndricos, una alta irradiancia incrementa significativamente la potencia generada, principalmente a través del aumento de la corriente. Sin embargo, es esencial gestionar la temperatura del panel para evitar pérdidas de eficiencia que podrían reducir el voltaje y, por ende, la producción total de energía. En una configuración cilíndrica, el ángulo de incidencia de la irradiancia cambia a lo largo del día, lo que puede complicar la gestión térmica y la eficiencia del panel.

Como un subproducto de la alta irradiancia, el aumento de la temperatura del panel en configuraciones cilíndricas puede reducir la eficiencia del sistema. Este efecto adverso es aún más pronunciado en superficies curvas, donde la distribución del calor no es uniforme y puede generar puntos calientes, lo que afecta la eficiencia del panel al reducir el voltaje. Es crucial controlar los efectos del calentamiento en estos paneles cilíndricos mediante el uso de técnicas de enfriamiento o materiales avanzados que ayuden a disipar el calor.

La correlación negativa entre la irradiancia y el voltaje en paneles cilíndricos subraya la importancia de equilibrar la captación de luz solar y el control térmico para evitar una disminución significativa del voltaje. Aunque la irradiancia es alta, la forma cilíndrica del panel puede generar diferencias en la captación de luz solar a lo largo de su superficie, lo que afecta el voltaje general del sistema. Mejorar el diseño del panel cilíndrico y optimizar la gestión térmica son esenciales para mantener una generación de energía eficiente en estas configuraciones no convencionales.

3.8.5. Análisis Eléctrico - Superficie Curva

El análisis de los datos recolectados en un sistema fotovoltaico instalado en superficies curvas revela una relación significativa entre las variables que influyen en la generación de potencia, tales como la irradiancia solar, la temperatura del panel y la potencia generada. La disposición curva de los paneles fotovoltaicos introduce dinámicas particulares, ya que la geometría curva afecta la captación de irradiancia y la distribución de la temperatura a lo largo de la superficie del panel. Esto añade un nivel de complejidad en la conversión de energía, impactando tanto el rendimiento como la eficiencia del sistema.

Irradiancia: Principal Impulsor de la Generación de Potencia en Superficies Curvas

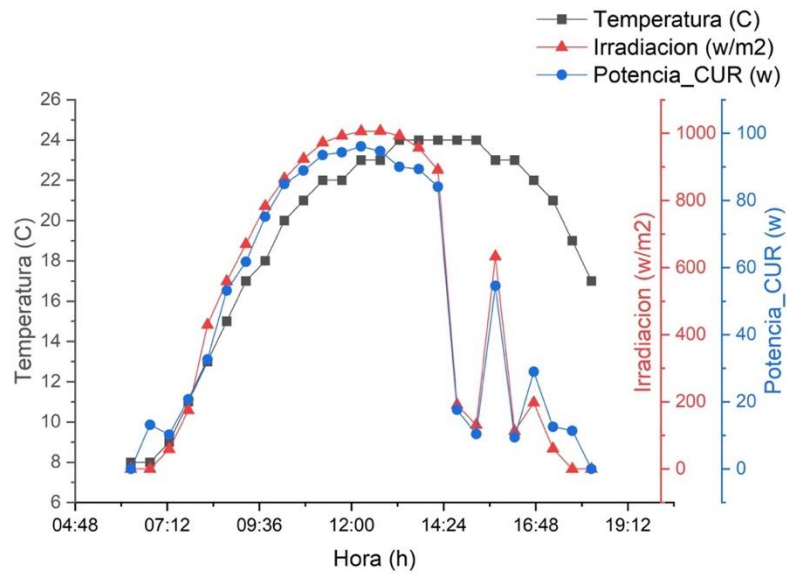


Figura 30: *Generación de Potencia en función de irradiancia - Curva*

Nota: Esta figura muestra la relación de variables temperatura, irradiancia y potencia en la configuración Curva.
Fuente: Propia.

La irradiancia solar, es decir, la cantidad de energía que incide sobre la superficie curva del panel es el factor más influyente en la generación de electricidad. A lo largo del día, la irradiancia comenzó en 0 W/m² a las 06:15, alcanzando su punto máximo de 993 W/m² a las 12:15 horas, y luego disminuyó gradualmente hacia las últimas horas del día. Dado que el panel está instalado en una superficie curva, la captación de irradiancia varía en función del ángulo de incidencia, permitiendo que diferentes partes del panel reciban más o menos luz solar en diferentes momentos del día.

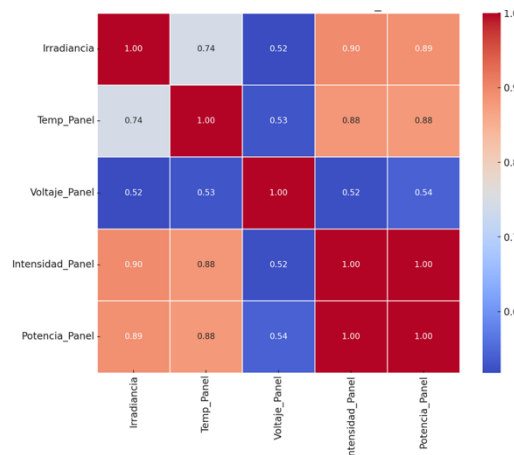


Tabla 29: *Matriz de Correlación de Variables Eléctrica – Curvo.*

Nota: Esta figura muestra la correlación principal de irradiancia y variables eléctrica.
Fuente: Propia.

Esta disposición curva tiene el potencial de mejorar la captación de irradiancia en ciertas condiciones, pero también puede generar puntos de sombra o concentrar más calor en ciertas áreas, lo que afecta la eficiencia de conversión energética. A pesar de estas complejidades, la irradiancia se correlaciona positivamente con la potencia generada, con una relación extremadamente fuerte (+0.89). Esto subraya que a medida que la irradiancia aumenta, la corriente generada también se incrementa de manera proporcional, favoreciendo la producción de energía.

Correlación de la Irradiancia con Otras Variables en Superficies Curvas

La relación entre la irradiancia y la temperatura del panel (+0.74) en una configuración curva positiva fuerte. A medida que la irradiancia aumenta, la temperatura del panel también se incrementa considerablemente, alcanzando un máximo de 37,1°C a las 12:45 horas. Aunque una mayor irradiancia es favorable para generar más electricidad, el aumento de la temperatura del panel limita la eficiencia del sistema. En superficies curvas, este efecto puede ser más pronunciado debido a la distribución desigual del calor, lo que hace que ciertas áreas del panel se sobrecalienten más que otras.

Existe una correlación negativa fuerte entre la irradiancia y el voltaje del panel (-0.52). A medida que la irradiancia y la temperatura aumentan, el voltaje del panel disminuye. En superficies curvas, esta relación se ve influenciada por la variabilidad en la captación de irradiancia en diferentes partes del panel, lo que genera una distribución térmica no uniforme. Esto puede afectar el rendimiento global del sistema si no se gestiona adecuadamente la disipación de calor.

La intensidad de corriente generada por el panel muestra una correlación extremadamente fuerte con la irradiancia (+0.90). Dado que la potencia generada es el producto del voltaje y la corriente, el aumento de la irradiancia se traduce en un incremento de la corriente, y, por lo tanto, en un mayor rendimiento energético. En superficies curvas, esta captación de irradiancia desde múltiples ángulos puede maximizar la corriente generada, pero debe gestionarse adecuadamente el calor para evitar pérdidas de eficiencia.

La potencia generada por el sistema en superficies curvas está directamente relacionada con la irradiancia (+0.89). A medida que la irradiancia aumenta, la potencia también lo hace de manera casi proporcional. Sin embargo, la geometría curva del panel introduce ciertos

desafíos, ya que la variabilidad en la distribución de la irradiancia puede generar puntos de alta temperatura que afectan el rendimiento total del sistema.

Implicaciones para la Generación Fotovoltaica en Superficies Curvas

En sistemas curvos, la captación de irradiancia desde diferentes ángulos aumenta la generación de corriente, lo que a su vez incrementa la potencia generada. Sin embargo, el control térmico del panel es crucial para evitar que el sobrecalentamiento en ciertas áreas del panel disminuya el rendimiento general. Las superficies curvas permiten una captación más efectiva de la luz solar en ciertos momentos del día, pero requieren un manejo térmico más sofisticado.

A medida que la irradiancia aumenta, la temperatura del panel en una configuración curva también lo hace, lo que puede reducir significativamente la eficiencia. El sobrecalentamiento afecta la salida de voltaje y, por lo tanto, la potencia generada. Para mantener una eficiencia óptima en superficies curvas, es esencial implementar soluciones de gestión térmica, como el uso de materiales que disipan mejor el calor o ventilación activa que evite el sobrecalentamiento.

La disminución del voltaje con el aumento de la irradiancia y la temperatura subraya la necesidad de un balance adecuado entre la captación de energía y el control térmico en superficies curvas. Aunque la irradiancia es alta y la corriente aumenta, si el voltaje cae demasiado, la potencia total generada puede verse comprometida. Mejorar el diseño térmico del sistema en superficies curvas es fundamental para mantener un rendimiento estable y eficiente.

3.8.6. Análisis Eléctrico Voltaje – Parámetros eléctricos.

El análisis de los datos presentados en la figura 30 permite evaluar el comportamiento del voltaje en diferentes configuraciones de paneles solares: superficie plana, cilíndrica y curva. El comportamiento del voltaje en estos paneles se estudia a lo largo del día, permitiendo identificar patrones y diferencias clave en el rendimiento de cada tipo de superficie.

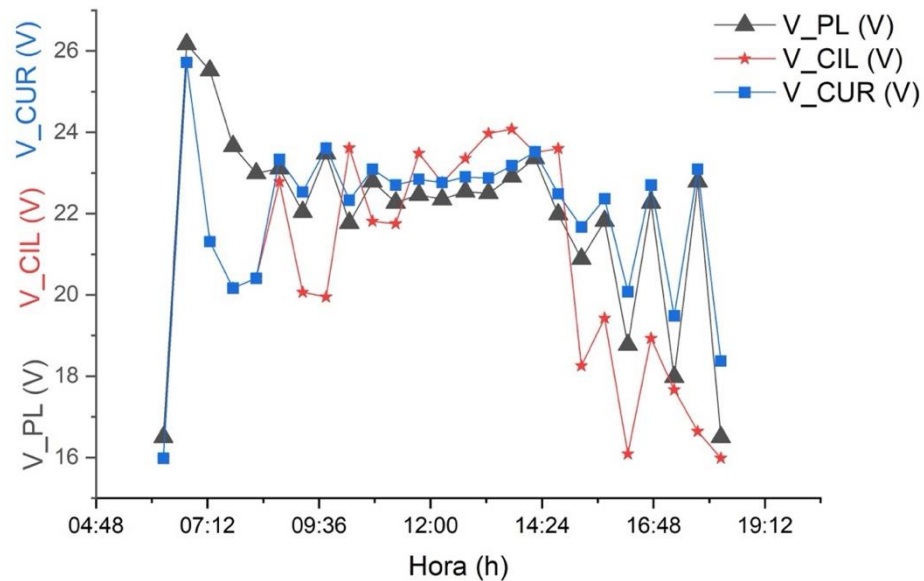


Figura 31: Comparativa de voltajes en diferentes superficies
 Nota: Esta figura muestra las diferencias de voltaje por cada superficie.
 Fuente: Propia.

Análisis de los datos de voltaje:

Voltaje en el panel de superficie plana (V_PL):

- El voltaje inicial a las 06:45 es elevado (26,17 V), pero experimenta una disminución significativa entre las 07:15 y 07:45 (25,52 V a 23,66 V), estabilizándose luego en un rango entre 22,5 V y 23,48 V a medida que avanza el día.

- El voltaje muestra cierta estabilidad entre las 10:15 y 14:15, con ligeras variaciones alrededor de los 23 V. Esta estabilidad sugiere un buen rendimiento durante las horas centrales del día.

Voltaje en el panel de superficie cilíndrica (V_CIL):

- El voltaje en la configuración cilíndrica muestra una tendencia inicial más baja, con un voltaje cercano a 20,42 V a las 07:15, comparado con la configuración plana.

- Sin embargo, alrededor del mediodía, el voltaje en esta superficie comienza a igualarse y alcanza valores cercanos a 23 V en algunos momentos, sugiriendo un aumento de rendimiento a medida que el ángulo solar cambia.

Voltaje en el panel de superficie curva (V_CUR):

- Similar a la configuración cilíndrica, el voltaje en la superficie curva comienza más bajo que la superficie plana, pero también muestra un patrón de aumento estable, especialmente hacia las horas del mediodía y la tarde.

- A partir de las 11:45, el voltaje en la superficie curva alcanza valores muy cercanos a los de la superficie plana, con picos cercanos a 23 V.

Implicaciones:

Superficie plana: Aunque presenta un rendimiento superior en las primeras horas del día, su voltaje disminuye rápidamente, lo que podría limitar la capacidad de generación de energía en la tarde.

Superficies cilíndricas y curvas: Estas configuraciones muestran un rendimiento más uniforme a lo largo del día, y aunque no alcanzan los valores iniciales de la superficie plana, se desempeñan mejor en las horas centrales del día, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones en superficies no convencionales, donde la radiación solar directa no es constante.

Este comportamiento sugiere que la implementación de paneles en superficies curvas y cilíndricas podría ser más adecuada en situaciones donde la exposición solar es irregular o cambia a lo largo del día, como en estructuras móviles o fachadas de edificios, permitiendo una captación más consistente de energía solar.

3.8.7. Análisis Eléctrico Intensidad – Parámetros eléctricos.

El análisis de la figura 32 permite evaluar el comportamiento de la corriente eléctrica generada por tres configuraciones de paneles solares (superficie plana, cilíndrica y curva) a lo largo del día. La intensidad de corriente es un parámetro clave que refleja el rendimiento de los paneles fotovoltaicos en diferentes condiciones de iluminación y geometrías de instalación.

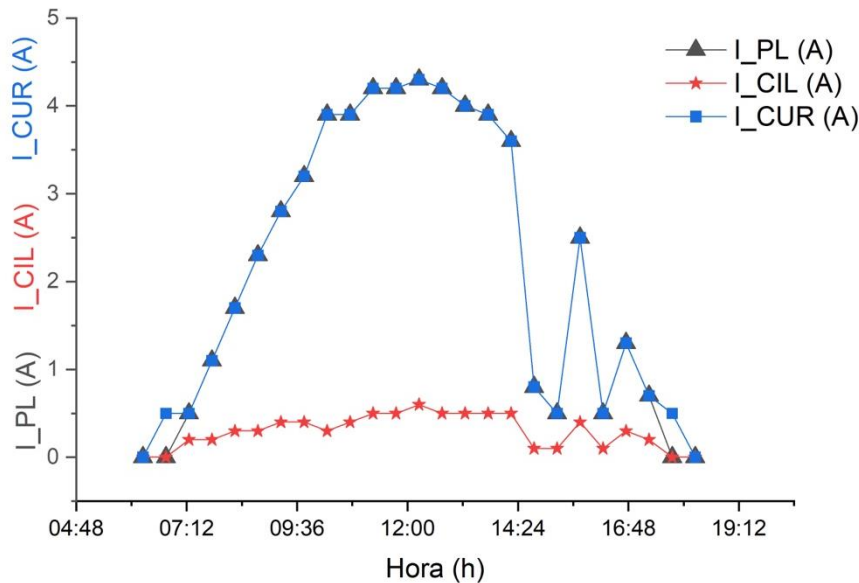


Figura 32: Comparativa de intensidad en diferentes superficies
 Nota: Esta figura muestra las diferencias de intensidad por cada superficie.
 Fuente: Propia.

Análisis de los datos de intensidad:

Intensidad en el panel de superficie plana (I_PL):

- La intensidad en el panel de superficie plana muestra un rápido aumento desde las primeras horas de la mañana, alcanzando su valor máximo a las 11:45 con una corriente de aproximadamente 4,3 A.

- Después del mediodía, la intensidad comienza a descender de manera gradual, alcanzando valores cercanos a 0.5 A alrededor de las 15:15.

- Este comportamiento sugiere que la superficie plana es más eficiente durante las horas de máxima radiación solar, pero su rendimiento disminuye rápidamente a medida que el sol se aleja de su ángulo óptimo.

Intensidad en el panel de superficie cilíndrica (I_CIL):

- El panel cilíndrico presenta una intensidad mucho más baja en comparación con el panel plano, con un máximo de 0.6 A alcanzado a las 12:15.

- Sin embargo, la corriente generada es más estable a lo largo del día, lo que indica que la geometría cilíndrica es más eficiente en la captación de radiación solar difusa, pero no alcanza los picos de rendimiento de la superficie plana.

Intensidad en el panel de superficie curva (I_CUR):

- La intensidad en el panel curvo sigue un comportamiento similar al del panel plano, pero con un pico máximo ligeramente inferior, alcanzando alrededor de 4.2 A a las 11:45.

- Este tipo de superficie también muestra un buen rendimiento durante las horas de mayor radiación solar, pero su curva de intensidad es más uniforme que la de la superficie plana.

Implicaciones:

Superficies planas: Son las más eficientes durante las horas de máxima radiación solar, con picos de corriente más altos. Sin embargo, su rendimiento cae rápidamente fuera de las horas centrales del día.

Superficies cilíndricas y curvas: Aunque no logran los picos de intensidad de las superficies planas, muestran una curva de intensidad más estable y consistente a lo largo del día, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones en las que la radiación solar es menos directa o constante, como en superficies no convencionales.

Este análisis sugiere que la superficie curva ofrece un buen compromiso entre eficiencia máxima y estabilidad de rendimiento a lo largo del día, mientras que la superficie cilíndrica puede ser adecuada en aplicaciones donde la captación de radiación difusa es preferible.

3.8.8. Análisis Eléctrico Potencia – Parámetros eléctricos.

El análisis de la figura 33 muestra el comportamiento de la potencia generada por tres configuraciones de paneles solares: implantación plana, cilíndrica y curva. La potencia es uno de los parámetros más importantes para evaluar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos y depende tanto de la intensidad de la radiación solar como de la geometría de los paneles.

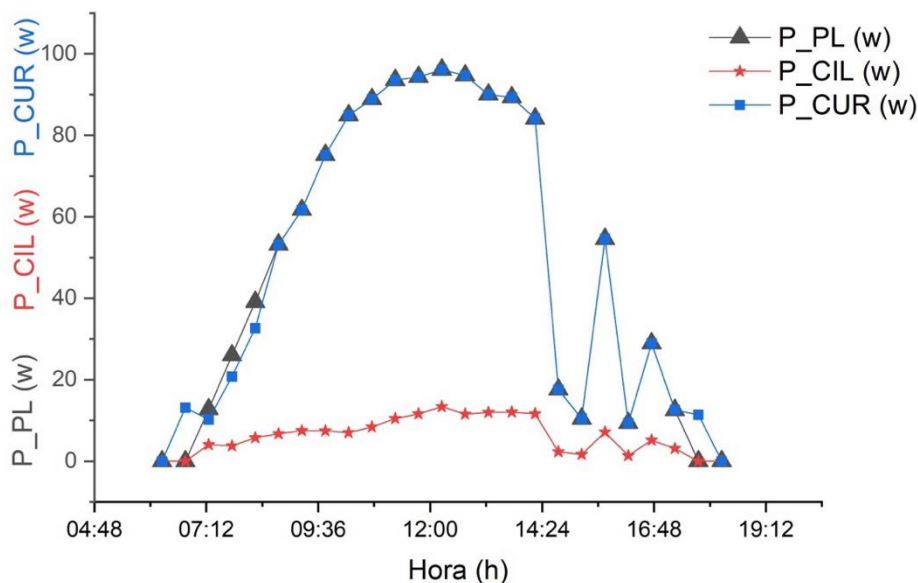


Figura 33: Comparativa de potencia en diferentes superficies
 Nota: Esta figura muestra las diferencias de intensidad por cada superficie.
 Fuente: Propia.

Análisis de los datos:

Potencia en el panel de superficie plana (P_{PL}):

- La potencia generada por el panel en superficie plana comienza a aumentar desde las primeras horas de la mañana, alcanzando su valor máximo de alrededor de 96 W a las 11:45.
- Posteriormente, la potencia comienza a disminuir progresivamente a partir de las 12:15, siguiendo una tendencia decreciente hasta llegar a valores cercanos a 0 W hacia las 15:45.
- Este comportamiento refleja un buen rendimiento durante las horas de mayor radiación solar, pero la potencia disminuye rápidamente una vez que el ángulo solar deja de ser óptimo.

Potencia en el panel de superficie cilíndrica (P_{CIL}):

- En comparación con la superficie plana, la potencia generada en el panel cilíndrico es considerablemente menor, con valores máximos de aproximadamente 13 W a las 12:15.
- La potencia en esta configuración es más constante a lo largo del día, manteniéndose en un rango bajo pero estable, lo que sugiere que esta geometría es más adecuada para captar radiación solar difusa.

Potencia en el panel de superficie curva (P_CUR):

- El panel curvo sigue un comportamiento similar al panel plano, alcanzando una potencia máxima de cerca de 94 W a las 12:15.

- Sin embargo, la potencia en la superficie curva es algo más estable a lo largo del día, con una menor variabilidad en comparación con la superficie plana, lo que indica un mejor aprovechamiento de la radiación solar en horas óptimas.

Implicaciones:

Superficie plana: Ideal para captar radiación solar directa en las horas centrales del día, logrando picos de potencia más altos, pero con una caída rápida fuera de esas horas.

Superficie cilíndrica: Aunque la potencia es baja, su rendimiento es más constante, lo que la hace adecuada para entornos donde la radiación solar directa no es la predominante.

Superficie curva: Esta configuración ofrece un equilibrio entre rendimiento máximo y estabilidad a lo largo del día, siendo una buena opción en aplicaciones donde se busca mantener una generación de energía más uniforme.

Estos resultados sugieren que, mientras que los paneles planos son más eficientes en las horas de máxima radiación solar, los paneles cilíndricos y curvos pueden ser más efectivos en condiciones donde la radiación solar varía en ángulo o intensidad, como en superficies no convencionales o aplicaciones urbanas.

3.9. Análisis De Factor Campo

La figura proporcionada por el Factor de campo (FF) de tres configuraciones diferentes de paneles fotovoltaicos: FF_PL (panel plano), FF_CIL (panel cilíndrico), y FF_CUR (panel curvo) a lo largo de un ciclo diario. El Factor de campo (Fill Factor, FF) es una métrica clave en la evaluación del rendimiento de un panel solar, que se define como la relación entre la potencia máxima del panel y el producto del voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito.

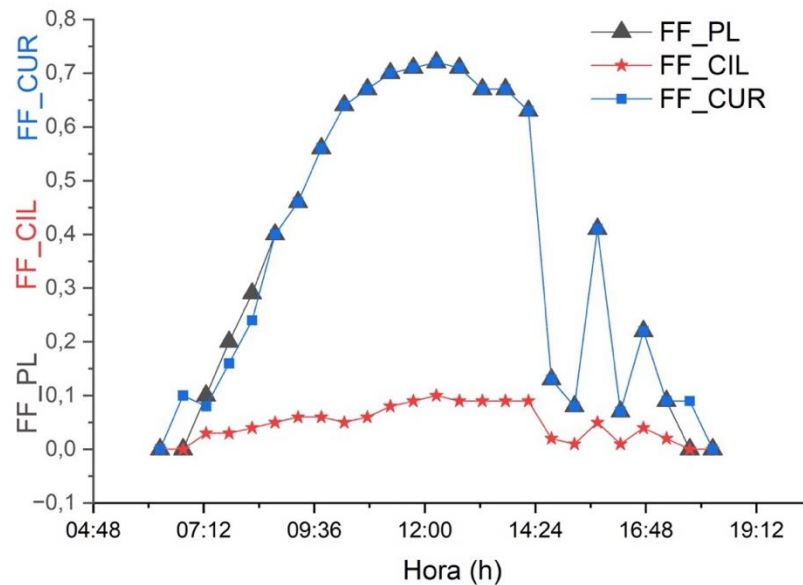


Figura 34: Factor de Campo – Plano – Cilindro - Curva
 Nota: Esta figura muestra el rendimiento de las configuraciones de implementación.
 Fuente: Propia.

3.9.1. FF_PL (Superficie Plana):

El FF_PL comienza en 0,00 antes de las 07:00 y aumenta gradualmente, alcanzando un valor máximo de 0,72 a las 12:15, justo antes del mediodía, cuando la irradiancia es más alta.

Después de su pico, el FF_PL disminuye de manera más gradual, con fluctuaciones hacia las 14:00, y luego desciende hasta 0,00 a las 17:45.

Este comportamiento es típico de los paneles planos, donde el rendimiento sigue estrechamente la irradiancia y la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, el rendimiento disminuye levemente debido a la pérdida de eficiencia.

3.9.2. FF_CIL (Superficie Cilíndrico):

El FF_CIL tiene un comportamiento bastante constante y bajo a lo largo del día, con valores que oscilan entre 0,03 y 0,09.

El valor más alto registrado para FF_CIL es 0,09 a las 12:45, lo que refleja un rendimiento limitado en comparación con las otras configuraciones.

El bajo valor del FF_CIL puede explicarse por la geometría cilíndrica, que afecta la captación uniforme de la irradiancia, generando una distribución desigual de luz en el panel.

3.9.3. FF_CUR (Superficie Curvo):

El FF_CUR sigue un comportamiento intermedio entre el panel plano y el cilíndrico. Alcanza un valor máximo de 0,71 alrededor de las 12:15, lo que es comparable al panel plano.

Sin embargo, el FF_CUR muestra caídas abruptas y fluctuaciones a partir de las 14:00 horas, lo que sugiere que la captación de irradiancia en la superficie curva no es uniforme durante todo el día, lo que genera inestabilidad en el rendimiento.

3.9.4. Comparación entre las Configuraciones:

Rendimiento del Panel Plano (FF_PL):

El panel plano muestra el mejor rendimiento global en términos de FF, con una curva de crecimiento clara hacia el mediodía y una disminución moderada después del pico. Esto refleja una alta eficiencia de conversión durante las horas de mayor irradiancia.

La estabilidad de FF_PL sugiere que, bajo condiciones de irradiancia estable, el panel plano tiene un comportamiento predecible y eficiente.

Rendimiento del Panel Cilíndrico (FF_CIL):

El panel cilíndrico, aunque captura irradiancia desde múltiples ángulos a lo largo del día, muestra un bajo rendimiento en términos de FF. Esto es posiblemente debido a la distribución no homogénea de la irradiancia sobre su superficie, lo que provoca una menor eficiencia de conversión.

La constancia de los valores bajos sugiere que, aunque la geometría cilíndrica permite una captación continua de luz, no optimiza la conversión de energía en las mismas condiciones que las otras configuraciones.

Rendimiento del Panel Curvo (FF_CUR):

El panel curvo muestra un comportamiento más cercano al panel plano, con un FF máximo similar. Sin embargo, las fluctuaciones significativas en la tarde indican que la captación de luz en las superficies curvas es menos uniforme.

Las caídas abruptas después de las 14:00 horas pueden estar asociadas con el cambio en el ángulo de incidencia solar o la generación de sombras en ciertas áreas del panel curvo, lo que afecta el rendimiento general.

3.9.5. Validación de los Datos:

Consistencia del Comportamiento:

Los datos son consistentes con el comportamiento esperado de los paneles fotovoltaicos. El panel plano y el curvo muestran picos de rendimiento cercanos al mediodía, cuando la irradiancia es mayor. En cambio, el panel cilíndrico mantiene valores bajos de

manera constante, lo que refleja su menor eficiencia en comparación con las otras configuraciones.

Relación con la Irradiancia y la Temperatura:

- El Factor de Campo (FF) está fuertemente influenciado por la irradiancia. A medida que la irradiancia aumenta, el FF mejora, alcanzando su máximo cerca del mediodía. Sin embargo, la temperatura también juega un papel importante, ya que los valores de FF descienden ligeramente después del pico de irradiancia, debido a las pérdidas de eficiencia causadas por el sobrecalentamiento de los paneles.

Anomalías en el Panel Curvo (FF_CUR):

Las fluctuaciones observadas en FF_CUR después de las 14:00 horas podrían estar relacionadas con la geometría del panel, que podría estar generando sombras o pérdidas de eficiencia debido a cambios en el ángulo de incidencia de la luz solar. Esto sugiere que, aunque el panel curvo tiene un rendimiento prometedor, su geometría requiere mejoras para evitar pérdidas de eficiencia durante ciertas horas del día.

3.10. Análisis De Eficiencia de conversión energética (η)

La figura proporcionada por la Eficiencia de Conversión Energética (η) de tres configuraciones diferentes de paneles fotovoltaicos: η_{PL} (panel plano), η_{CIL} (panel cilíndrico), y η_{CUR} (panel curvo) a lo largo de un ciclo diario. La Eficiencia de conversión energética (η) es una métrica clave en la evaluación del rendimiento de un panel solar, que se define como la relación entre la potencia máxima del panel y el producto del área del panel y la irradiancia solar incidente

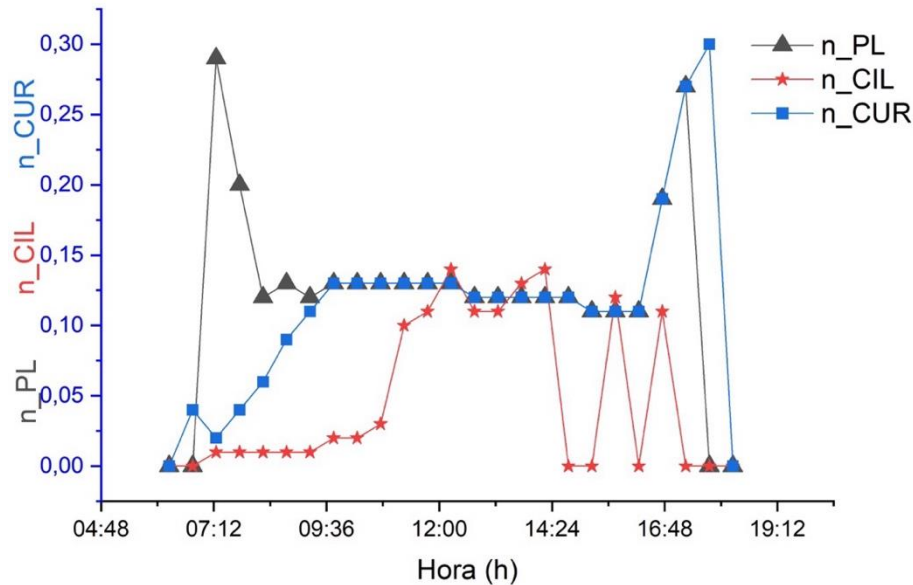


Figura 35: Eficiencia de conversión – Plano – Cilindro - Curva

Nota: Esta figura muestra la eficiencia de conversión de las configuraciones de implementación.

Fuente: Propia.

3.10.1. n_{PL} (Superficie Plana):

- Aunque la superficie plana muestra un pico de eficiencia temprano, alrededor de las 07:15 con un valor de 0.286, su rendimiento disminuye a lo largo del día, estabilizándose en valores más bajos.

- Esto sugiere que, para superficies planas, el rendimiento fotovoltaico es más alto en las primeras horas de la mañana, posiblemente debido a una mejor captación de radiación solar directa en ese momento. Sin embargo, a medida que el ángulo solar cambia, la eficiencia disminuye.

3.10.2. n_{CIL} (Superficie Cilíndrica):

- La eficiencia en superficies cilíndricas aumenta de manera más gradual, alcanzando su punto máximo a las 12:15 (0.149), para luego reducirse drásticamente después de las 14:48.

- Esto indica que las superficies cilíndricas podrían ser más adecuadas para captar radiación difusa a lo largo de un mayor rango de tiempo durante el día. Aunque no alcanzan el mismo nivel de eficiencia máxima que las planas, ofrecen una curva de eficiencia más constante durante un período prolongado.

3.10.3. n_CUR (Superficie Curva):

- La superficie curva muestra una eficiencia creciente desde las primeras horas, alcanzando su máximo valor de 0.248 alrededor de las 16:48, lo que indica un rendimiento más estable y eficiente hacia las últimas horas de la tarde.

- Esta característica hace que las superficies curvas sean una opción viable para aprovechar la radiación solar en momentos del día en que otras geometrías pierden eficiencia, lo que es particularmente útil en condiciones en las que los paneles no están orientados directamente hacia el sol.

3.10.4. Implicaciones para la generación fotovoltaica en superficies no convencionales:

- Superficies no convencionales como las curvas y cilíndricas pueden ser una solución efectiva para optimizar la captación de radiación solar en aplicaciones donde las superficies planas no son prácticas o no ofrecen la mejor eficiencia durante todo el día.

- Las superficies cilíndricas y curvas, aunque no logran los picos de eficiencia que las superficies planas consiguen en la mañana, permiten una captación más uniforme y sostenida a lo largo del día, lo cual es ideal para aplicaciones en superficies que no están orientadas de manera óptima hacia el sol o en estructuras móviles.

- Estos resultados sugieren que, en proyectos de generación fotovoltaica en superficies no convencionales, como en fachadas, vehículos o infraestructura urbana, los diseños que incorporen geometrías curvas y cilíndricas pueden maximizar la producción de energía, especialmente en momentos donde las condiciones de iluminación son menos favorables para paneles planos.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la irradiancia es el factor más determinante en la generación de energía en paneles fotovoltaicos flexibles instalados en superficies no convencionales, como superficies planas, curvas y cilíndricas. La irradiancia mostró una correlación extremadamente fuerte con la potencia generada, evidenciada por los altos valores de correlación observados, lo que refuerza la importancia de maximizar la captación de irradiancia para optimizar el rendimiento del sistema. No obstante, factores como la temperatura del panel y la distribución de la irradiancia en las diferentes configuraciones geométricas también juegan un papel crucial en la eficiencia global del sistema.

Los resultados obtenidos muestran que los paneles instalados en superficies planas presentan el mejor rendimiento en términos de eficiencia y estabilidad, logrando valores de factor de campo (FF) de hasta 0.72 durante las horas de mayor irradiancia. La capacidad de estos paneles para mantener un rendimiento constante bajo condiciones de alta irradiancia sugiere que las configuraciones planas siguen siendo la opción más eficiente y predecible para la generación fotovoltaica. La geometría plana permite una captación uniforme de irradiancia y una distribución térmica más controlada, minimizando las pérdidas por sobrecalentamiento.

En contraste, los paneles instalados en superficies cilíndricas mostraron un rendimiento limitado, con FF que no superaron los 0.09 en ningún momento del día. Aunque esta configuración permite la captación de irradiancia desde múltiples ángulos, la geometría cilíndrica introduce una captación no homogénea de la luz solar, lo que afecta negativamente la eficiencia de conversión. El análisis sugiere que la geometría cilíndrica genera variaciones significativas en la distribución de la irradiancia sobre la superficie del panel, resultando en un rendimiento inferior al esperado, especialmente en comparación con las configuraciones planas.

Por otro lado, los paneles instalados en superficies curvas presentaron un comportamiento intermedio entre las configuraciones planas y cilíndricas. Aunque lograron alcanzar un FF máximo similar al de los paneles planos (0.71), las fluctuaciones observadas en las horas de la tarde indican una captación de irradiancia menos eficiente durante todo el día. Este comportamiento sugiere que, aunque las superficies curvas pueden ofrecer ventajas en términos de diseño y flexibilidad de instalación, la distribución de la irradiancia no es

completamente uniforme, lo que afecta la eficiencia general del sistema. Se requieren ajustes en el diseño y la gestión térmica para mejorar la estabilidad de la captación de irradiancia en esta configuración.

Además, el análisis de la correlación entre la irradiancia y otras variables como la temperatura del panel y el voltaje revela la importancia de gestionar adecuadamente los efectos térmicos en todas las configuraciones. La correlación positiva entre la irradiancia y la temperatura del panel (+0.95) destaca que, a mayor irradiancia, mayor es la temperatura alcanzada por el panel, lo que afecta la eficiencia del sistema. A medida que la temperatura aumenta, se observan pérdidas de voltaje significativas, con una correlación negativa (-0.91) entre irradiancia y voltaje. Este fenómeno es especialmente relevante en las superficies curvas y cilíndricas, donde la captación desigual de irradiancia puede generar puntos calientes, agravando las pérdidas de eficiencia.

En general, los resultados obtenidos subrayan la necesidad de optimizar no solo la captación de irradiancia, sino también la gestión térmica en las configuraciones no convencionales. Las superficies planas ofrecen la mejor relación entre captación de irradiancia, estabilidad térmica y eficiencia de conversión. No obstante, las superficies curvas y cilíndricas presentan oportunidades para mejorar el rendimiento mediante el uso de materiales avanzados y estrategias de diseño que mitiguen los efectos del sobrecalentamiento y distribuyan mejor la luz solar a lo largo de la superficie del panel.

Implicaciones para la Investigación y Aplicaciones Prácticas

Este estudio tiene implicaciones importantes para el diseño y la operación de sistemas fotovoltaicos flexibles en superficies no convencionales. Si bien los paneles planos siguen siendo la opción más eficiente, los avances en la gestión térmica y la optimización geométrica podrían aumentar significativamente el rendimiento de los paneles instalados en superficies curvas y cilíndricas. Además, las configuraciones no convencionales podrían ser una opción viable en contextos arquitectónicos o donde las superficies planas no sean factibles, siempre que se implementen estrategias adecuadas para gestionar la captación de irradiancia y las variaciones térmicas.

Recomendaciones

Optimización del diseño térmico: Es esencial mejorar la gestión de la temperatura en las configuraciones cilíndricas y curvas para minimizar las pérdidas de eficiencia causadas por el sobrecalentamiento. La implementación de materiales con alta conductividad térmica o la mejora de la ventilación podría mitigar los efectos adversos de la temperatura elevada.

Mejoras en la captación de irradiancia: En las configuraciones curvas y cilíndricas, se deben explorar estrategias para distribuir de manera más uniforme la luz solar sobre la superficie del panel. Esto podría incluir el ajuste de la geometría del panel o el uso de mecanismos de seguimiento solar para optimizar la captación durante todo el día.

Investigaciones adicionales: Se recomienda continuar investigando cómo las variaciones en la geometría del panel y las condiciones ambientales afectan la eficiencia de los paneles fotovoltaicos flexibles. Estudios futuros deberían centrarse en identificar las mejores prácticas para maximizar la eficiencia en contextos donde las superficies no convencionales son necesarias.

Referencias:

- 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) : date, 5-10 June 2016. (2016). IEEE.
- Bonkaney, A. L., Madougou, S., & Adamou, R. (2017). Impact of Climatic Parameters on the Performance of Solar Photovoltaic (PV) Module in Niamey. *Smart Grid and Renewable Energy*, 08(12), 379–393. <https://doi.org/10.4236/sgre.2017.812025>
- BougeRV. (2020). *User Manual CIGS Thin-film Solar Panel*. www.bougerv.com
- Bovesecchi, G., Pierro, M., Petitta, M., & Cornaro, C. (2024). Flexible photovoltaic systems for renewable energy integration in Lazio region, Italy. *Energy Reports*, 12, 1221–1234. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.07.029>
- Chen, J., Yang, B., Hou, H., Li, H., Liu, L., Zhang, L., & Yan, X. (2019). Disordered, Large Interlayer Spacing, and Oxygen-Rich Carbon Nanosheets for Potassium Ion Hybrid Capacitor. *Advanced Energy Materials*, 9(19). <https://doi.org/10.1002/aenm.201803894>
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: An overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(2–3), 69–92. <https://doi.org/10.1002/pip.541>
- Dallaev, R., Pisarenko, T., Papež, N., & Holcman, V. (2023). Overview of the Current State of Flexible Solar Panels and Photovoltaic Materials. In *Materials* (Vol. 16, Issue 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma16175839>
- Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-100-30-&-100-50-ES. (n.d.). *Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-100-30-&-100-50-ES*.
- DATOS_HISTORICOS_REMMAQ. (n.d.). Retrieved August 27, 2024, from <https://datosambiente.quito.gob.ec/>
- Energy Agency, I. (n.d.). *Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025*.
- Energy Agency, I. (2021a). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level*. www.iea.org/t&c/

- Energy Agency, I. (2021b). *World Energy Outlook Special Report Latin America Energy Outlook*. www.iea.org/terms
- Ghosh, A., & Satya Prasad, V. K. (2024). Evaluating the influence of environmental factors on household solar PV pro-environmental behavioral intentions: A meta-analysis review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *190*, 114047. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114047>
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2018). Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *26*(7), 427–436. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>
- Hu, L., Zhao, Q., Huang, S., Zheng, J., Guan, X., Patterson, R., Kim, J., Shi, L., Lin, C. H., Lei, Q., Chu, D., Tao, W., Cheong, S., Tilley, R. D., Ho-Baillie, A. W. Y., Luther, J. M., Yuan, J., & Wu, T. (2021). Flexible and efficient perovskite quantum dot solar cells via hybrid interfacial architecture. *Nature Communications*, *12*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20749-1>
- Huang, A. Q. (2017). Power Semiconductor Devices for Smart Grid and Renewable Energy Systems. *Proceedings of the IEEE*, *105*(11), 2019–2047. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2687701>
- Iea. (2024). *World Energy Investment 2024*. www.iea.org
- International Energy Agency, I. (2024). *Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026*. www.iea.org
- Irena. (2021). *Renewable Power Generation Costs 2020*. www.irena.org
- Ise, F., & Projects GmbH, P. (2024). *Photovoltaics Report-Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with the support of PSE Projects GmbH*. www.ise.fraunhofer.de
- Kim, H., Cha, K., Fthenakis, V. M., Sinha, P., & Hur, T. (2014). Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems. *Solar Energy*, *103*, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.008>

- Kim, S., Hoang, V. Q., & Bark, C. W. (2021). Silicon-based technologies for flexible photovoltaic (Pv) devices: From basic mechanism to manufacturing technologies. In *Nanomaterials* (Vol. 11, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano11112944>
- Liu, W., Liu, Y., Yang, Z., Xu, C., Li, X., Huang, S., Shi, J., Du, J., Han, A., Yang, Y., Xu, G., Yu, J., Ling, J., Peng, J., Yu, L., Ding, B., Gao, Y., Jiang, K., Li, Z., ... Liu, Z. (2023). Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges. *Nature*, *617*(7962), 717–723. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05921-z>
- Luque, A. ., & Hegedus, Steven. (2018). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.
- Nusrat, M., Mekhilef, S., Mubin, M., Ahmed, S., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., & Alshammari, O. (2024). Advancements in flexible power point tracking and power control strategies for photovoltaic power plants: A comprehensive review. In *Energy Reports* (Vol. 12, pp. 237–250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.012>
- Panagoda, S. S., Tilanka, G., Sandunika, I., Alwis, S., Panagoda, L. P. S. S., Sandeepa, R. A. H. T., Perera, W. A. V. T., Sandunika, D. M. I., Siriwardhana, S. M. G. T., Alwis, M. K. S. D., & Dilka, S. H. S. (2023). Advancements In Photovoltaic (Pv) Technology for Solar Energy Generation. In *J. Res. Technol. Eng* (Vol. 4, Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/372364724>
- Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E., & Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. In *Progress in Materials Science* (Vol. 110). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100619>
- Shayan, M. E., Najafi, G., Ghobadian, B., Gorjian, S., Mazlan, M., Samami, M., & Shabanzadeh, A. (2022). Flexible Photovoltaic System on Non-Conventional Surfaces: A Techno-Economic Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(6). <https://doi.org/10.3390/su14063566>
- Solargis Prospect*. (n.d.). Retrieved August 27, 2024, from <https://apps.solargis.com/prospect/detail/yC9m93IMTRNpn6X9/overview>

- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., & Alkasrawi, M. (2021). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of the Total Environment*, 759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>
- Weiß, K. A., Klimm, E., & Kaaya, I. (2022). Accelerated aging tests vs field performance of PV modules. In *Progress in Energy* (Vol. 4, Issue 4). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac890a>
- Yang, X., Weber, K., Hameiri, Z., & De Wolf, S. (2017). Industrially feasible, dopant-free, carrier-selective contacts for high-efficiency silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(11), 896–904. <https://doi.org/10.1002/pip.2901>
- Zhou, Y., Liu, F., & Wang, H. (2017). Novel organic–inorganic composites with high thermal conductivity for electronic packaging applications: A key issue review. *Polymer Composites*, 38(4), 803–813. <https://doi.org/10.1002/pc.23641>
- Zhu, R., Zhang, Z., & Li, Y. (2019). Advanced materials for flexible solar cell applications. In *Nanotechnology Reviews* (Vol. 8, Issue 1, pp. 452–458). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2019-0040>

Anexos

Anexo 1

Hoja de Datos Panel Solar

Anexo 2

Hoja de Datos MPPT

Anexo 3

Esquema de Conexión

Anexo 4

Información MPPT