



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A TRAVÉS DEL  
ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR Y DEMANDA ENERGÉTICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: FREDDY FABIAN VINTIMILLA URGILES**  
**EDDY RAMIRO SÁEZ CASTILLO**  
**TUTORA: ING. NATALIA XIMENA GONZÁLEZ ÁLVAREZ, PhD.**

Cuenca - Ecuador  
2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Freddy Fabian Vintimilla Urgiles con documento de identificación N° 0106121148 y Eddy Ramiro Sáez Castillo con documento de identificación N° 1900649565; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 23 de marzo del 2026

Atentamente,



Freddy Fabian Vintimilla Urgiles  
0106121148



Eddy Ramiro Sáez Castillo  
1900649565

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Freddy Fabian Vintimilla Urgiles con documento de identificación N° 0106121148 y Eddy Ramiro Sáez Castillo con documento de identificación N° 1900649565, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico a través del análisis estocástico de la radiación solar y demanda energética”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de marzo del 2026

Atentamente,



Freddy Fabian Vintimilla Urgiles  
0106121148



Eddy Ramiro Sáez Castillo  
1900649565

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Natalia Ximena González Álvarez con documento de identificación N° 1205860974, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR Y DEMANDA ENERGÉTICA, realizado por Freddy Fabian Vintimilla Urgiles con documento de identificación N° 0106121148 y por Eddy Ramiro Sáez Castillo con documento de identificación N° 1900649565, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de marzo del 2026

Atentamente,



Ing. Natalia Ximena González Álvarez, PhD.

1205860974

# Índice general

<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>10</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>11</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>PROBLEMA DE ESTUDIO</b>	<b>18</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>20</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>22</b>
<b>1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>26</b>
1.1. Introducción al aprovechamiento de la energía solar . . . . .	26
1.2. Importancia de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador . .	27
1.3. Contexto nacional del uso de energía solar en Ecuador . . . . .	27
1.4. Ventajas del uso de sistemas fotovoltaicos . . . . .	28
1.5. Radiación solar y sus componentes . . . . .	29
1.6. Elementos del sistema fotovoltaico . . . . .	30
1.6.1. Módulos . . . . .	30
1.6.1.1. Factores a considerar . . . . .	31
1.6.1.2. Características físicas y eléctricas de los paneles solares . . . . .	31
1.6.2. Inversor . . . . .	32
1.6.2.1. Selección del inversor . . . . .	33
1.6.2.2. Características para seleccionar el inversor . . . . .	33
1.6.2.3. Características eléctricas del inversor . . . . .	34
1.6.2.4. Dimensionamiento de un inversor . . . . .	35

1.6.3.	Medidor Bidireccional . . . . .	35
1.6.3.1.	Selección del medidor bidireccional . . . . .	35
1.6.3.2.	Aspectos a considerar . . . . .	36
1.6.3.3.	Características eléctricas del medidor bidireccional . . . . .	36
1.6.3.4.	Características físicas del medidor bidireccional . . . . .	37
1.6.4.	Cableado de corriente continua y alterna . . . . .	38
1.6.4.1.	Selección del cable . . . . .	38
1.6.4.2.	Selección del cable corriente continua . . . . .	38
1.6.4.3.	Selección del cable corriente alterna . . . . .	38
1.6.4.4.	Características eléctricas . . . . .	39
1.6.4.5.	Características eléctricas del cable de corriente alterna . . . . .	39
1.6.4.6.	Características físicas del cable de corriente continua . . . . .	39
1.6.4.7.	Características físicas del cable de corriente alterna . . . . .	40
1.6.5.	Tipo de protecciones eléctricas en corriente continua y alterna . . . . .	40
1.6.5.1.	Protecciones en corriente continua . . . . .	40
1.6.5.2.	Protecciones en corriente alterna . . . . .	41
1.6.5.3.	Características eléctricas del equipo de protección . . . . .	41
1.6.5.4.	Características físicas del equipo de protección . . . . .	41
1.7.	Tipos de configuraciones . . . . .	42
1.7.1.	Sistema Fotovoltaico Conectado a red . . . . .	42
1.7.2.	Sistemas aislados (“off-grid”) . . . . .	43
1.7.3.	Sistemas híbridos . . . . .	44
1.7.4.	Parámetros de diseño . . . . .	44
1.8.	Demanda energética . . . . .	44
1.9.	Análisis estocástico aplicado a la energía solar . . . . .	45
1.9.1.	Definición de procesos estocásticos y su aplicación en ingeniería energética . . . . .	46
1.9.2.	Distribuciones probabilísticas . . . . .	46
1.9.2.1.	Distribución Normal . . . . .	46
1.9.2.2.	Distribución Weibull . . . . .	46
1.9.2.3.	Distribución Beta . . . . .	47
1.9.2.4.	Distribución Log-normal . . . . .	47
1.10.	Introducción al método de simulación Monte Carlo . . . . .	47
<b>2.</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO MEDIANTE ANÁLISIS ESTOCÁSTICO</b>	<b>49</b>
2.1.	Descripción del Lugar de Estudio . . . . .	49
2.1.1.	Localización Geográfica, Coordenadas y características climáticas . . . . .	49
2.1.2.	Datos Meteorológicos . . . . .	50
2.2.	Metodología de Recolección y Procesamiento de Datos . . . . .	52
2.2.1.	Periodo de Estudio y Frecuencia Temporal de los Datos (horaria, diaria, mensual) . . . . .	52
2.2.2.	Identificación de Valores Atípicos (outliers) . . . . .	53
2.2.3.	Tratamiento de Datos Vacíos (missing data) . . . . .	53
2.2.4.	Verificación Cruzada con Datos Mensuales Oficiales . . . . .	53
2.3.	Análisis Estadístico y Ajuste de Distribuciones . . . . .	53
2.3.1.	Análisis de la Irradiancia y Demanda Energética . . . . .	54
2.3.2.	Ajuste de Distribuciones Probabilísticas . . . . .	54
2.4.	Selección de Paneles Solares . . . . .	55
2.5.	Modelo del Sistema Fotovoltaico . . . . .	55
2.5.1.	Inclinación de los Paneles Solares . . . . .	56
2.5.2.	Temperatura De Los Módulos Fotovoltaicos . . . . .	56
2.5.3.	Potencia Generada por los Módulos . . . . .	57
2.5.4.	Calculo del Inversor . . . . .	59
2.5.5.	Pérdidas por el Tipo de Cableado . . . . .	60
2.5.6.	Calculo del conductor de Corriente Continua (CC) . . . . .	60

2.5.7.	Calculo del conductor de Corriente Alterna (AC)	62
2.5.8.	Determinación del Contador Bidireccional	63
2.5.9.	Consideraciones del Sistema Fotovoltaico	63
2.5.10.	Pérdidas del Rendimiento del Sistema por Suciedad	64
2.5.11.	Determinación de la Energía Neta Útil	65
2.6.	Modelo Estocástico	66
2.6.1.	Aplicación del método Monte Carlo para Irradiancia y Demanda	66
2.6.2.	Simulación Horaria de la Generación y Demanda	75
2.6.3.	Modelado Inversor en Condiciones Probabilísticas	76
2.7.	Dimensionamiento Final del Sistema Fotovoltaico	76
2.7.1.	Selección del Sistema con Base en Criterios Técnicos y Energéticos	77
2.7.2.	Protecciones Eléctricas de Corriente Continua y Corriente Alterna	78
2.7.2.1.	Ecuaciones para el calculo de los equipos de protecciones	78
2.8.	Simulación de Monte Carlo	80
2.8.1.	Simulación de Monte Carlo en el Sistema Fotovoltaico	80
2.8.1.1.	Aplicaciones en Sistemas Fotovoltaicos	80
2.8.1.2.	Análisis de Fiabilidad de Sistemas Fotovoltaicos Mediante el Método de Monte Carlo	81
2.8.1.3.	Irradiancia Diaria vs Irradiancia mensual	82
2.8.2.	Análisis del Déficit y Exceso de Energía	83
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>84</b>
3.1.	Presentación de resultados	84
3.2.	Análisis del Perfil de Carga	85
3.2.1.	Análisis de la Simulación de Monte Carlo para Demanda	85
3.2.2.	Análisis de la Simulación de Monte Carlo para la Irradiancia Solar	89
3.2.3.	Análisis de la Simulación de Monte Carlo para la Temperatura	91
3.2.4.	Análisis estadísticos de la radiación y la demanda.	93
3.2.5.	Comportamiento energético del sistema en diferentes escenarios.	94
3.2.6.	Energía Ahorrada y Exceso	94
3.3.	Análisis del Dimensionamiento Estocástico	95
3.3.1.	Potencia Fotovoltaica.	95
3.3.2.	Generación del Sistema Fotovoltaico	96
3.3.3.	Inclinación de los paneles	100
3.3.4.	Calculo del inverso y dimensión de los string	101
3.3.5.	Curvas de confiabilidad y probabilidad de pérdida de carga.	102
3.4.	Comparación entre el diseño estocástico y el determinista.	102
3.4.0.1.	Sistema real	103
3.4.0.2.	Sistema fotovoltaico establecido	103
3.4.0.3.	Datos del sistema	104
3.4.0.4.	Simulación de Monte Carlo de la irradiación y temperatura 2019	105
3.4.0.5.	Generación de los paneles en el año 2019	108
3.4.0.6.	Porcentaje de error de la Generación simulada con la real	109
3.5.	Discusión de Resultados.	111
3.5.1.	Interpretación técnica de los resultados.	111
3.5.2.	Evaluación del desempeño bajo variabilidad solar y de demanda.	111
3.5.3.	Comparación con estudios similares y validación de la metodología.	112
3.6.	Análisis de Datos	112
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES</b>	<b>114</b>
4.1.	Conclusiones generales	114
4.2.	Recomendaciones técnicas	115
4.3.	Recomendaciones para investigaciones futuras	115

# Índice de figuras

1.1. Aprovechamiento de la energía solar [1]. . . . .	26
1.2. Energía renovable en el Ecuador [2]. . . . .	27
1.3. Tipos radiación Solar [3]. . . . .	29
1.4. Factores que influyen en la radiación solar[3]. . . . .	30
1.5. Módulos solares [4]. . . . .	30
1.6. Inversor [3]. . . . .	33
1.7. Medidor bidireccional [2]. . . . .	36
1.8. Cableado electrónico en la instalación fotovoltaica [5]. . . . .	40
1.9. Diagrama Unifilar del sistema fotovoltaico. . . . .	43
2.1. Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Demanda. . . . .	69
2.2. Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Irradiación Solar. . . . .	72
2.3. Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Temperatura. . . . .	74
3.1. Perfil de carga de un solo día. . . . .	85
3.2. Función de Densidad de Probabilidad de Demanda. . . . .	86
3.3. Demanda Real vs Demanda Simulada . . . . .	88
3.4. Número de ocurrencia de la demanda . . . . .	88
3.5. Función de Densidad de Probabilidad de Irradiancia Solar. . . . .	89
3.6. Irradiación Solar Real vs Irradiación Solar Simulada. . . . .	90
3.7. Número de Ocurrencia. . . . .	91
3.8. Función de Densidad de Probabilidad de Temperatura. . . . .	91
3.9. Función de Densidad de Probabilidad de Temperatura. . . . .	92
3.10. Numero de ocurrencia de la temperatura . . . . .	93
3.11. Energía Ahorrada y Energía en Exceso. . . . .	95
3.12. Demanda Simulada vs Producción de Energía con 4 paneles. . . . .	99
3.13. Demanda Simulada vs Producción de Energía con 5 paneles. . . . .	99
3.14. Demanda Simulada vs Producción de Energía con 6 paneles. . . . .	100

# Índice de tablas

1.1. Elementos considerados para el cálculo de la demanda energética . . . . .	45
2.1. Irradiancia Solar [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] del sitio seleccionado . . . . .	50
2.2. Temperatura C del sitio seleccionado . . . . .	51
2.3. Parámetros del panel FV de 545 W . . . . .	58
2.4. Potencia del panel en un día típico . . . . .	59
3.1. Resultado de la temperatura de la célula aplicando la fórmula $T_C$ . . . . .	96
3.2. Potencia generada de un panel por un día. . . . .	97
3.3. Comparación de generación de paneles con la demanda simulada . . . . .	98
3.4. Distribución de los paneles en el sistema fotovoltaico. . . . .	101
3.5. Irradiancia solar del 1 de enero de 2019 . . . . .	105
3.6. Monte Carlo: comparación de temperatura. . . . .	106
3.7. Monte Carlo: comparación de Irradiancia solar. . . . .	107
3.8. Característica de los paneles existente . . . . .	108
3.9. Tabla de generación por día de los paneles fotovoltaicos . . . . .	109
3.10. Porcentaje de error entre generación real y simulada . . . . .	110

## AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra gratitud a la Universidad Politécnica Salesiana y, en particular, a la Facultad de Ingeniería Eléctrica, por brindarnos una formación sólida y por el acompañamiento constante durante nuestra preparación profesional. Y agradecemos a todos nuestros docentes, quienes con su dedicación y conocimientos contribuyeron significativamente a nuestra formación. De manera especial, agradecemos a Ingeniera Natalia González, por su guía, compromiso y valioso acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo.

*Freddy Vintimilla*

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este trabajo. En primer lugar, agradezco a Dios, por brindarme la fortaleza, salud y sabiduría necesarias para enfrentar cada etapa de este proceso académico. A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi principal fuente de motivación. Gracias por creer en mí, incluso en los momentos más difíciles. A la Universidad Politécnica Salesiana y a la Facultad de Ingeniería Eléctrica, por brindarme una formación académica de calidad y por fomentar mi crecimiento profesional. A todos mis docentes, por compartir sus conocimientos y por su compromiso en nuestra formación. En especial, agradezco a la Ingeniera Natalia González, por su guía, paciencia y orientación durante el desarrollo de esta tesis. Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros de carrera, por su apoyo, colaboración y por todos los momentos compartidos a lo largo de esta etapa.

*Eddy Sáez*

## DEDICATORIA

A mi madre, Dalia Vintimilla, y a mis abuelos Víctor y Mercedes, que quienes con esfuerzo hicieron todo lo posible para cumplir esta meta y por estar en los momentos adversos que atravesé en este largo camino. A mis tíos y tías, que me brindaron consejo y escucharon mis problemas o cuando sentía que no podía continuar. A mi hermana que nunca dejó de apoyarme a pesar de las adversidades.

*Freddy Vintimilla*

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus sacrificios y su fe en mí, por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la humildad. A mis hermanos, por ser mi inspiración diaria y por acompañarme en este proceso lleno de desafíos y aprendizajes. A mis amigos verdaderos, por su compañía, palabras de aliento y comprensión cuando más lo necesité.

*Eddy Sáez*

## GLOSARIO

**W:** Vatios.

**Irr:** Irradiación.

**kWh:** Energía activa consumida.

**Isc:** Corriente cortocircuito.

**Voc:** Tensión al vacío.

**CA:** Corriente Alterna.

**CC:** Corriente Continua.

**I:** Corriente.

**C:** Centígrado

## RESUMEN

En esta investigación se propone una metodología para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos que permite evitar el sobredimensionamiento de componentes como paneles solares y baterías, con el objetivo de optimizar la eficiencia del sistema y reducir costos. La metodología se basa en el análisis estadístico de la radiación solar y la demanda energética, empleando simulaciones de Monte Carlo para evaluar la generación y el consumo de energía. Este enfoque no solo previene el exceso de dimensionamiento, sino que también garantiza la confiabilidad del sistema, lo que se traduce en una reducción significativa de los costos de instalación y mantenimiento. Asimismo, se destaca que un diseño eficiente puede fomentar la adopción de la energía solar en diversos sectores y contribuir al desarrollo sostenible.

Se presentan distintos algoritmos que facilitan el proceso de dimensionamiento, considerando variables clave como la irradiación solar y la demanda energética. Además, se analizan las características de los paneles solares y se abordan aspectos técnicos relevantes, como la inclinación óptima de los paneles y el cálculo del inversor. Para validar la metodología propuesta, se comparan los datos obtenidos mediante simulaciones con los de un sistema fotovoltaico ya instalado en la Universidad Politécnica Salesiana, obteniéndose un error del 3.75% entre la generación simulada y la generación real. Este resultado confirma la efectividad del método desarrollado, consolidándolo como una herramienta útil y confiable para ingenieros y técnicos del sector energético.

## ABSTRACT

This study focuses on the design and sizing of photovoltaic systems, with the goal of optimizing their efficiency and reducing costs. The importance of solar energy as a renewable and sustainable source is highlighted, especially in Ecuador, where climatic conditions are favorable for its implementation. The research seeks to develop a methodology that allows for the accurate measurement of photovoltaic systems, avoiding the oversizing of components such as solar panels and batteries.

The study is based on the statistical analysis of solar radiation and energy demand, using Monte Carlo simulations to evaluate energy generation and consumption. This methodology not only prevents oversizing but also ensures system reliability, resulting in significant savings in installation and maintenance costs. It emphasizes that efficient design can encourage the adoption of solar energy in various sectors, contributing to more sustainable development.

It includes a theoretical framework that covers fundamental concepts such as the photovoltaic effect and the characteristics of solar cells. Various algorithms are presented to facilitate system sizing, considering key variables such as irradiation and energy demand. In addition, the characteristics of solar panels are analyzed, and technical aspects such as panel inclination and inverter calculation are discussed.

In the results analysis section, the data obtained through simulations are compared with a photovoltaic system already installed at the Salesian Polytechnic University. The results show a 3.75 % error in simulated generation compared to actual generation, which validates the proposed methodology. This analysis allows us to conclude that the developed methodology is effective for sizing photovoltaic systems, offering a valuable tool for engineers and technicians in the industry.

# INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de diversificar las fuentes de energía han llevado a un aumento significativo del uso de tecnologías de energía renovable en todo el mundo. Entre estas, la energía solar fotovoltaica se destaca como una de las más prometedoras, gracias a su capacidad para generar electricidad de manera sostenible y a su potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles. En este contexto, este documento se centra en el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos con un enfoque particular, la optimización de su rendimiento.

La energía solar fotovoltaica se basa en el principio del efecto fotovoltaico, un fenómeno por el cual se convierte la luz solar en electricidad gracias al uso de materiales semiconductores, como el silicio. Este proceso no solo es fundamental para generar energía limpia, sino que también representa una oportunidad para mejorar la seguridad energética y fomentar el desarrollo económico en diversas regiones, especialmente en países en vías de desarrollo como Ecuador. La ubicación geográfica de Ecuador, con su alta radiación solar durante la mayor parte del año, lo convierte en un candidato ideal para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

Sin embargo, a pesar de las ventajas evidentes de la energía solar, implementar sistemas fotovoltaicos conlleva varios desafíos. Uno de los principales problemas es el sobredimensionamiento de los componentes del sistema, como los paneles solares y las baterías, lo que puede resultar en costos innecesarios y en una menor viabilidad económica. Por lo tanto, resulta crucial desarrollar metodologías que conduzcan a un dimensionamiento preciso y eficiente de estos sistemas y que garantice que se satisfagan las necesidades energéticas sin incurrir en gastos excesivos.

Este documento propone una metodología innovadora que combina el análisis estocástico de la radiación solar y la demanda energética, y utiliza simulaciones de Monte Carlo para evaluar la generación

y el consumo de energía. Mediante esta técnica se pueden modelar diferentes escenarios en función de variaciones en la radiación solar y en la demanda de energía, lo que proporciona una visión más completa y precisa del rendimiento del sistema fotovoltaico. Al aplicar esta metodología, se busca no solo optimizar el dimensionamiento de los sistemas, sino también mejorar su confiabilidad y eficiencia operativa.

El documento abarca conceptos fundamentales relacionados con la energía solar fotovoltaica, incluyendo el efecto fotovoltaico, las características de las celdas solares y los diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos disponibles en el mercado. Se discuten también los algoritmos utilizados para el dimensionamiento de los sistemas, que consideran variables claves, entre ellas la irradiación solar, la demanda energética y las características técnicas de los paneles solares. Estos elementos son esenciales para comprender cómo se puede maximizar la producción de energía y minimizar los costos.

Además, incluye un análisis que compara los resultados obtenidos a través de simulaciones y un sistema fotovoltaico ya instalado en la Universidad Politécnica Salesiana. Este análisis no solo valida la metodología propuesta, sino que también proporciona información valiosa sobre la efectividad de los sistemas fotovoltaicos en condiciones reales. Los resultados muestran un error del 3.75 % en la generación simulada en comparación con la generación real, lo que indica que la metodología es efectiva y puede ser utilizada como una herramienta de apoyo en el diseño de sistemas fotovoltaicos.

La importancia de esta investigación radica en su potencial para contribuir a la transición hacia un modelo energético más sostenible. Al optimizar el diseño y dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos, se puede fomentar la adopción de la energía solar en diversos sectores, desde el residencial hasta el industrial, lo que a su vez puede generar beneficios económicos y ambientales significativos. La implementación de sistemas fotovoltaicos más eficientes no solo beneficiará a los usuarios individuales, sino que también contribuirá a la sostenibilidad energética del país y a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En definitiva, esta investigación aborda un tema de gran relevancia en el contexto actual de la energía renovable. A través de una metodología innovadora y un análisis riguroso, se busca proporcionar una guía práctica para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y contribuir así a la promoción de la energía solar como una solución viable y sostenible para las necesidades energéticas de Ecuador y otras regiones en condiciones similares. En tal sentido, la investigación presentada no solo tiene el potencial de

mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, sino que también puede servir como un modelo para futuras investigaciones en el campo de la energía renovable.

## PROBLEMA DE ESTUDIO

El aumento de la demanda de energías renovables y la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero han dado lugar a que los sistemas fotovoltaicos se conviertan en una alternativa atractiva para la producción de electricidad. No obstante, la variabilidad de la radiación solar y del requerimiento energético implican un desafío para el diseño y la planificación de dichos sistemas. Para optimizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos y reducir los costos, se requiere anticipar con precisión los patrones de generación y consumo de energía [6].

El propósito de este proyecto consiste en crear un método para calcular el tamaño de sistemas fotovoltaicos a través del análisis aleatorio de la radiación solar y la necesidad de energía. El método sugerido considerará la variabilidad de los dos factores y ofrecerá una estimación probabilística de los patrones de generación de energía necesarios para satisfacer la demanda de una vivienda. La metodología se implementó en un edificio residencial representativo de Cuenca, Ecuador, donde se llevó a cabo la recolección de datos sobre la radiación solar y la demanda de energía a lo largo de un periodo apropiado [7].

El principal desafío de este proyecto consiste en examinar con precisión los patrones de irradiación solar y la demanda de energía, los cuales están influenciados por varios factores, tales como el clima, la hora del día, las estaciones y el comportamiento de las personas que ocupan el espacio. Para afrontar este desafío, el proyecto empleará información del pasado y modelos estadísticos que examinan los patrones y las tendencias de la irradiación solar, así como la demanda de energía. Asimismo, el proyecto pondrá en escena la incertidumbre vinculada con las proyecciones y aplicará un método probabilístico para calcular el tamaño del sistema fotovoltaico [8].

El objetivo de este proyecto es desarrollar una metodología que facilite la medición precisa de los sistemas fotovoltaicos basada en el análisis estadístico de la irradiación solar y la demanda de energía.

Al emplear este método, se puede prevenir el sobredimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos, lo que puede resultar en un significativo ahorro de gastos sin poner en riesgo la confiabilidad del sistema. Asimismo, las conclusiones del proyecto podrían ayudar a crear sistemas energéticos más eficientes y sostenibles en Ecuador y en otras áreas con condiciones climáticas parecidas.

## JUSTIFICACIÓN

El estudio se justifica en la importancia de incluir en el diseño y la determinación del tamaño de los sistemas fotovoltaicos la variabilidad de la radiación solar y la demanda de energía, con el fin de disminuir costos y aumentar su viabilidad económica. En la actualidad, la energía solar se ha convertido en una fuente de energía renovable muy reconocida, aunque su adopción puede resultar cara debido a la considerable inversión inicial que se necesita. Para lograr que la tecnología resulte más accesible y competitiva respecto a otras fuentes de energía, se requiere identificar métodos para reducir los gastos relacionados con la instalación y el mantenimiento de sistemas fotovoltaicos. El propósito de la investigación es crear un método que facilite el diseño de sistemas fotovoltaicos de forma eficiente, que evite el sobredimensionamiento de elementos como paneles solares, baterías, entre otros componentes. Como resultado, se dotará a los ingenieros y técnicos de la industria de sistemas más eficaces y económicos, lo que fomentará la adopción de la energía solar en diversos sectores. El estudio gira en torno al desarrollo de un algoritmo que integra variables como la irradiación solar y la demanda energética, con el objetivo de determinar la configuración óptima de un sistema fotovoltaico. Además, se analizarán distintos escenarios de carga y se evaluarán los resultados obtenidos mediante simulaciones.

# OBJETIVOS

## 1. OBJETIVO GENERAL

Dimensionar un sistema fotovoltaico a través del análisis estocástico de la radiación solar y demanda energética.

## 2. OBJETIVO ESPECIFICO

- a)* Analizar las variables métricas y estadísticas meteorológicas que intervienen en la producción energética de los sistemas fotovoltaicos.
- b)* Diseñar un software que permita dimensionar de manera precisa un sistema fotovoltaico para una vivienda representativa de la ciudad de Cuenca, considerando la variabilidad estocástica de la irradiación solar y del perfil de demanda energética.
- c)* Analizar la producción energética del sistema fotovoltaico dimensionado en el punto anterior.
- d)* Verificar la efectividad del software mediante su implementación y comparación con los datos reales del sistema fotovoltaico de la Universidad Politécnica Salesiana.

## ESTADO DEL ARTE

M. Hashish [9] presenta una metodología de optimización multiobjetivo estocástica para determinar el nivel máximo permisible de penetración de energía fotovoltaica (FV) en sistemas conectados a la red, considerando costos y restricciones operativas. Se propone un enfoque híbrido que combina los algoritmos evolutivos NSGA-II y MOPSO, evaluados mediante la métrica de hipervolumen, tiempo de ejecución y análisis estadístico. La técnica recurre a la simulación Monte Carlo para modelar la incertidumbre en la generación solar, manteniendo objetivos conflictivos como costo y porcentaje. Los resultados muestran que el método híbrido supera a otros algoritmos en convergencia, diversidad y eficiencia computacional. Se concluye que la penetración máxima permitida sin colapsar la red es aproximadamente 81.5 % con costos optimizados y adaptable a condiciones meteorológicas variables. La estrategia favorece sistemas sostenibles, económicos y confiables, y se recomienda incorporar fuentes renovables adicionales en futuros estudios. M. Chasi Toapanta [10] propone un método basado en la simulación de mínimos cuadrados de Monte Carlo (LSMC) para determinar el mejor momento de inversión en plantas fotovoltaicas (PV) en Corea. La investigación se enfoca en cómo gestionar la incertidumbre en los precios de la energía y los certificados de energía renovable (REC) para maximizar la rentabilidad. Emplea modelos estadísticos y simulaciones para predecir ingresos a largo plazo, en función de variables como la generación solar, el precio del sistema de energía solar (SMP/Solares) y el precio del REC. Analiza diferentes escenarios de precios de energía y REC, y muestra que la decisión óptima de inversión puede variar según la capacidad de la planta y las condiciones de mercado. La metodología ayuda a los inversores a gestionar riesgos y a tomar decisiones informadas sobre cuándo invertir y con qué capacidad. Los resultados indican que plantas de menor capacidad pueden ofrecer mayores retornos a corto plazo, mientras que inversiones mayores pueden ser menos viables. Además, el trabajo sugiere ajustar las políticas de REC para incentivar inver-

siones sostenibles. La técnica propuesta puede aplicarse como una herramienta efectiva para optimizar decisiones de inversión en energías renovables, especialmente en mercados con alta volatilidad. G. Herrero López [11] ofrece dos modelos estocásticos innovadores para la predicción a corto plazo de la radiación solar y la generación de energía fotovoltaica (PV). El primero utiliza funciones base inciertas, considerando distribuciones como Gaussiana, Laplace y Uniforme, para modelar y prever el comportamiento probabilístico de la radiación solar. El segundo modelo aplica un espacio de estados estocástico, estimando parámetros y estados mediante un filtro de Kalman y un algoritmo de Expectativa-Maximización (EM), que permite seguir las fluctuaciones rápidas en la generación. Ambos métodos demuestran una alta precisión en predicciones en comparación con técnicas tradicionales de series temporales, como ARIMA. Según las pruebas en datos reales recogidos en un panel solar de 13,5 kW, los modelos alcanzan errores bajos y son adecuados para control en tiempo real y gestión energética. De acuerdo con los resultados, estas técnicas estocásticas ofrecen ventajas significativas para la predicción rápida y adaptable de la energía solar, fundamentales para integrar renovables en la red eléctrica. F. Laurentiu [12] propone métodos avanzados para predecir la producción de energía en sistemas fotovoltaicos tras trabajar con modelos estadísticos ARIMA y redes neuronales Artificial Neural Networks (ANN). Se aplicaron en dos estudios de caso: un sistema BIPV en un laboratorio, y un parque fotovoltaico grande en el sur de Rumania. Los resultados advierten que el modelo ARIMA (1,0,14) es más eficiente que la ANN para predicciones a corto plazo, especialmente en días con cielo parcialmente nublado y condiciones estables. Asimismo, se introdujo un índice de variabilidad de radiación solar (VDR) para mejorar la precisión en predicciones diarias considerando estados sinópticos. También se compararon diferentes modelos de predicción, se destaca la superioridad de ARIMA en precisión y eficiencia. Adicionalmente, se propuso un método de predicción optimizado usando la técnica GMDH para mejorar la estimación de la producción energética en parques solares. Este trabajo contribuye a la gestión eficiente y planificación de recursos en energías renovables por medio del empleo de herramientas estadísticas y de inteligencia artificial. Y. Zhang [13] revisa los avances en el uso de nanomateriales para mejorar la eficiencia de celdas solares fotovoltaicas. Se analizaron diferentes tipos de nanomateriales, como los de tamaño controlado, nanofibras y películas delgadas, que aumentan la absorción de luz y facilitan la transferencia de carga. La incorporación de estos nanomateriales en las capas de las celdas incrementa significativamente su rendimiento, estabili-

dad y durabilidad. De igual modo, se destacan las técnicas de síntesis y ensamblaje, como la deposición por vapor y métodos de solución, que posibilitan una integración eficiente en los dispositivos. El estudio también enfatiza los beneficios económicos y ambientales al destacar el potencial de estos nanomateriales para reducir costos y aumentar la adopción de energías renovables. Según la investigación, pese a algunos desafíos en la escalabilidad, los nanomateriales representan una frontera prometedora en el desarrollo de celdas solares de alta eficiencia.

L. Bin [14] presenta un análisis de la sostenibilidad de los sistemas de producción de energía eólica en diferentes regiones, en función de aspectos económicos, sociales y ambientales. Se emplean métodos de análisis multicriterio para evaluar el impacto y la viabilidad de proyectos eólicos, teniendo en cuenta variables como costos, beneficios sociales y emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con los resultados, la ubicación y el tamaño de los parques eólicos influyen en gran medida en su sostenibilidad y en la integración de criterios sociales y ambientales en la planificación, lo que puede mejorar su aceptación social y reducir impactos negativos. El trabajo destaca el valor de un enfoque holístico para promover energías renovables de manera sustentable. Se concluye que las investigaciones multidisciplinarias son esenciales para optimizar la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos eólicos en diferentes contextos regionales. k. Duwadi[15] realiza un análisis de Monte Carlo para evaluar el impacto de una alta penetración de sistemas solares residenciales en la tensión de la red eléctrica. Usa técnicas de computación de alto rendimiento para simular diferentes escenarios de generación y demanda, tomando en cuenta la variabilidad en la radiación solar y el consumo residencial. Según los resultados, una mayor adopción de paneles solares puede generar fluctuaciones significativas en los niveles de voltaje, lo que puede afectar la estabilidad y la seguridad de la red, pero mediante modelos estadísticos y técnicas de control, se pueden mitigar estos efectos y garantizar un funcionamiento confiable. La investigación pone en valor incorporar análisis probabilísticos en la planificación y operación de sistemas de energía distribuida con alta penetración solar. Adicionalmente, enfatiza el rol de la innovación tecnológica para gestionar estos desafíos y promover una integración eficiente de energías renovables. M. Hashish [16] evalúa la sostenibilidad del uso de biomasa para la producción de bioenergía, analizando aspectos económicos, ambientales y sociales. Se presenta un análisis multicriterio según variables como costos de producción, impacto en emisiones de gases de efecto invernadero y beneficios sociales, mediante metodologías como AHP y TOPSIS. Los

resultados indican que la viabilidad económica y la sostenibilidad ambiental dependen de la tecnología empleada y de la gestión de recursos. La implementación de políticas adecuadas y tecnologías innovadoras puede ayudar de forma decisiva en la aceptación y el impacto positivo de la bioenergía basada en biomasa. Igualmente, se destaca que la integración social y ambiental es clave para el crecimiento sustentable de este sector. En el estudio se concluye que la bioenergía de biomasa puede convertirse en una opción viable y sostenible cuando se aplican estrategias de gestión integradas y responsables.

# Capítulo 1

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1. Introducción al aprovechamiento de la energía solar

La energía solar es uno de los recursos renovables con mayor potencial para contribuir a la transición energética mundial, debido a su disponibilidad, sostenibilidad y rápida evolución tecnológica. Su aprovechamiento mediante sistemas fotovoltaicos (FV) y térmicos se ha consolidado como una alternativa estratégica para la diversificación de la matriz energética, la reducción de emisiones y el fortalecimiento de la seguridad energética. En países con altos niveles de radiación solar, como Ecuador y la región andina, el recurso solar representa una oportunidad para incrementar la generación limpia, disminuir la dependencia de fuentes fósiles y promover la generación distribuida [1], como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1: Aprovechamiento de la energía solar [1].

## 1.2. Importancia de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador

Las energías renovables (principalmente hidroeléctrica, eólica, solar, biomasa, biogás) son fundamentales para que Ecuador logre una matriz energética más limpia, segura y resiliente frente a cambios climáticos o variabilidad hídrica [1]. Por ejemplo, los datos oficiales indican que actualmente aproximadamente el 78 % de la generación eléctrica del país proviene de centrales hidráulicas, con sólo cerca del 12 % proveniente de fuentes no convencionales (solar, eólica, biomasa, etc.)[1], como se muestra en la figura 1.2. Esto muestra que, en Ecuador ya tiene una alta participación de renovables (hidroeléctricas), la utilización de fuentes renovables no convencionales como la solar aún es muy baja, lo que abre espacio para su expansión[1]. La incorporación creciente de tecnologías renovables es clave para:

- Reducir emisiones de gases de efecto invernadero.
- Disminuir la vulnerabilidad frente a sequías o reducción de caudales que afectan a la hidroeléctrica.
- Generar nuevos empleos y oportunidades económicas, especialmente en zonas rurales.

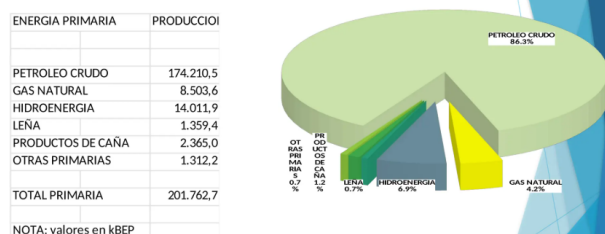


Figura 1.2: Energía renovable en el Ecuador [2].

## 1.3. Contexto nacional del uso de energía solar en Ecuador

A pesar del notable potencial solar del país, la producción de energía solar fotovoltaica en Ecuador es aún muy modesta en comparación con otros países. Por ejemplo, se menciona que alrededor de 2023 existían unas 30 centrales de generación solar fotovoltaica con menos de 50 MW cada una [17].

El gobierno y entidades públicas señalan que la inversión pública y privada en energías renovables no

convencionales (incluida la fotovoltaica) es “fundamental” para dinamizar la economía, generar empleo, incorporar nuevas tecnologías y diversificar la matriz energética [17].

Asimismo, la radiación solar del Ecuador favorece el uso de sistemas solares, especialmente en zonas rurales o aisladas, donde la conexión a la red puede ser limitada [17].

No obstante, persisten desafíos: la infraestructura de transmisión, los incentivos para generación distribuida, la financiación y la escala de los proyectos aún requieren mejoras para que la solar crezca de forma significativa [17].

## 1.4. Ventajas del uso de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos (paneles solares instalados en edificios, terrenos, microrredes) ofrecen varias ventajas frente a fuentes más convencionales (fósiles o hidráulicas) en el contexto ecuatoriano [18].

- Aprovechan directamente la radiación solar, recurso abundante en muchas zonas del país, lo que permite generación local distribuida [18].
- Permiten descentralización: los paneles pueden instalarse en viviendas, comercios, industrias, zonas rurales aisladas lo cual reduce pérdidas de transporte y mejora la cobertura [18].
- Comparados con centrales que dependen de agua (hidroeléctricas) o combustibles importados, los sistemas fotovoltaicos pueden tener costos más estables y menos vulnerabilidad ante factores externos (sequías, precios de combustibles) [18].
- Menor impacto ambiental: no requieren grandes embalses, no emiten directamente gases contaminantes y facilitan una transición energética más limpia [18].
- Modularidad y escalabilidad: se pueden instalar pocos paneles para autoconsumo o escalarlos para generación a mayor escala [18].

En Ecuador, ya se reporta que el uso de sistemas solares que contribuye a reducir la factura eléctrica, mejorar el acceso en zonas rurales y ofrecer solución ante fallas del sistema tradicional [1].

Por estas razones, los sistemas fotovoltaicos resultan una alternativa muy atractiva para complementar y diversificar la generación eléctrica en Ecuador [1].

## 1.5. Radiación solar y sus componentes

La radiación solar es la energía electromagnética emitida por el sol que llega a la tierra, y es esencial para procesos climáticos, biológicos y tecnológicos, como la generación de electricidad mediante paneles solares[3], como se observa en la figura 1.3. Se clasifica en:

- Radiación global: Total de energía solar que incide en un punto en la superficie terrestre, combinando radiación directa y difusa [3].
- Radiación directa: Energía que llega en línea recta desde el Sol, produciendo sombras definidas [3].
- Radiación difusa: Energía que se dispersa en todas direcciones debido a nubes y partículas en la atmósfera, sin producir sombras claras [3].

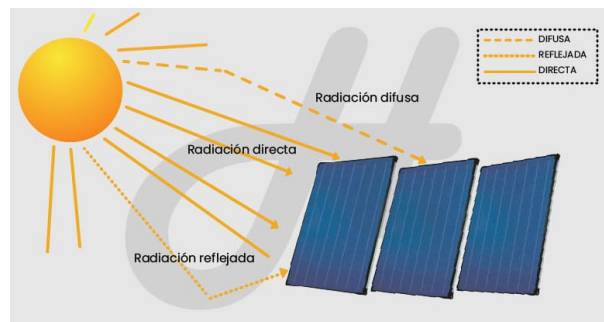


Figura 1.3: Tipos radiación Solar [3].

Los factores que influyen en la radiación que se observa en la figura 1.4, solar incluyen:

- Latitud: Menor latitud implica mayor incidencia de radiación solar a lo largo del año; en cambio, en mayores latitudes, la energía es más inclinada y disminuye [3].
- Inclinación: La inclinación de los paneles solares afecta la cantidad de energía que reciben, variando según la latitud y la época del año [3].
- Nubosidad: Las nubes pueden bloquear y dispersar la radiación solar, disminuyendo la radiación directa y aumentando la difusa [3].
- Estacionalidad: La cantidad de radiación solar cambia con las estaciones; se registra mayor radiación en verano y menor en invierno [3].

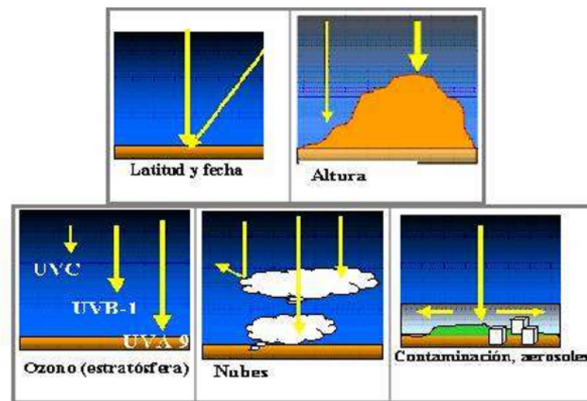


Figura 1.4: Factores que influyen en la radiación solar[3].

## 1.6. Elementos del sistema fotovoltaico

### 1.6.1. Módulos

Para elegir paneles solares, considere el consumo eléctrico, el área disponible, la eficiencia del panel, el lugar de instalación, el clima, la garantía y la credibilidad del fabricante. Analice su consumo anual, la potencia contratada y el espacio disponible. Evalúe la eficiencia del panel, su potencia máxima y el tipo de células solares. Priorice la garantía y la fiabilidad del fabricante [19, 20], lo cual se evidencia en la figura 1.5.



Figura 1.5: Módulos solares [4].

#### 1.6.1.1. Factores a considerar

**Consumo eléctrico:** Calcular el consumo anual de electricidad es clave para dimensionar la instalación de paneles solares [4, 21].

**Espacio disponible:** El área disponible limita la cantidad y el tamaño de los paneles [19, 20].

**Eficiencia:** La eficiencia del panel solar determina su capacidad de generación de energía a partir de la luz solar [19, 20].

**Potencia pico:** La potencia pico indica la máxima capacidad de generación de un panel en condiciones ideales [4, 21].

**Tipo de células solares:** Los paneles pueden ser monocristalinos, policristalinos o de película delgada, cada uno con sus propias características [4, 21].

**Ubicación y orientación:** La ubicación geográfica y la orientación de los paneles influyen en la cantidad de luz solar que reciben y, por lo tanto, en su rendimiento [19, 20].

**Condiciones climáticas:** Las temperaturas extremas pueden afectar el rendimiento de los paneles, por lo que es importante elegir paneles con un buen coeficiente de temperatura [19, 20].

#### 1.6.1.2. Características físicas y eléctricas de los paneles solares

Los paneles solares, compuestos de materiales como silicio y vidrio templado con marcos metálicos, convierten la luz solar en corriente continua mediante el efecto fotovoltaico. Sus características eléctricas, como la tensión y corriente de salida, y físicas, como las dimensiones y el peso, varían según su tipo y potencia, determinando su funcionamiento y eficiencia [19, 4].

##### Características eléctricas de los paneles solares

**Efecto fotovoltaico:** Los paneles solares generan electricidad a partir de la luz solar mediante celdas fotovoltaicas [20, 4].

**Voltaje y corriente:** Producen corriente continua (DC) con voltajes variables según la configuración y el número de celdas del panel. La corriente generada depende de la irradiación solar y la carga

conectada [19, 4].

**Potencia:** Se mide en vatios (W) y representa la potencia eléctrica generada por el panel [19, 4].

**Eficiencia:** Indica la eficiencia del panel solar, que varía según su tecnología [19, 21].

### **Características físicas de los paneles solares**

**Materiales:** Los paneles solares se componen de celdas de silicio, cubiertas de vidrio templado y un marco metálico [19, 21].

**Tamaño y peso:** Varían según la potencia y el panel [4, 21].

**Estructura:** Incluyen un marco de soporte y protección, cubierta frontal de vidrio, lámina posterior aislante y caja de conexiones [4, 21].

**Tecnología:** Pueden ser monocristalinos, policristalinos o de capa fina, variando en características y eficiencia [19, 20].

**Resistencia:** Están diseñados para resistir lluvia, nieve y viento [20, 21].

En resumen, los paneles solares transforman la luz solar en electricidad mediante materiales y tecnologías especializadas. Sus características eléctricas determinan su capacidad de generación, y las físicas, su durabilidad y adaptabilidad [20, 21].

#### **1.6.2. Inversor**

- Inversor: Convierte la corriente continua (CC) que generan los paneles en corriente alterna (CA) utilizable por los consumidores o la red eléctrica [3], como se detalla en la figura 1.6.

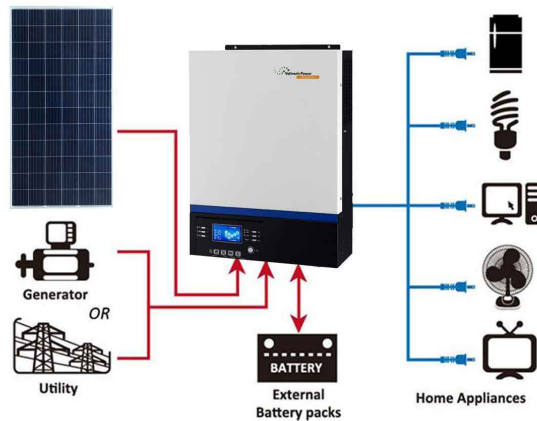


Figura 1.6: Inversor [3].

#### 1.6.2.1. Selección del inversor

A la hora de elegir un inversor para paneles solares, hay que tener en cuenta la potencia de los paneles, el tipo de sistema (conectado a la red, aislado o híbrido) y la eficiencia del inversor. También es importante evaluar la capacidad de sobrecarga, las protecciones de seguridad y las garantías ofrecidas [22, 23].

#### 1.6.2.2. Características para seleccionar el inversor

**Cálculo de la potencia:** Determina la potencia total generada por los paneles solares. El inversor debe tener una capacidad igual o ligeramente superior a la potencia total de los paneles [22, 23].

**Tipo de sistema:** El inversor debe cumplir con ciertos requisitos según su tipo. Si es conectado a la red, necesita ajustarse a la red eléctrica. Si es aislado, debe ser compatible con las baterías. Si es híbrido, debe funcionar tanto con la red como con las baterías [22, 23].

**Tipos de inversores:** Inversor de cadena: Ideal para sistemas pequeños y medianos con techos simples. Inversor centralizado: Bueno para grandes sistemas. Microinversores: Usados en techos complejos o con sombras [22, 23].

**Eficiencia del inversor:** La eficiencia mide la energía perdida al convertir CC a CA. Un inversor eficiente usa mejor la energía de los paneles [22, 23].

**Capacidad de sobrecarga:** Se debe asegurar que el inversor pueda manejar picos de carga [22, 23].

**Protecciones de seguridad:** Buscar inversores que ofrezcan protecciones contra sobretensiones, cortocircuitos y sobrecalentamiento [22, 23].

### 1.6.2.3. Características eléctricas del inversor

**Potencia nominal:** Es la capacidad máxima que el inversor puede proporcionar de manera continua, expresada en vatios (W) o kilovatios (kW) [22, 23].

**Eficiencia:** Es el porcentaje de energía que el inversor transforma de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). Una mayor eficiencia implica una menor pérdida de energía [22, 23].

**Voltaje de entrada:** El porcentaje de energía que el inversor es capaz de transformar de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) refleja su eficiencia operativa. Asimismo, el voltaje de corriente continua que los paneles solares suministran al inversor juega un papel fundamental en su desempeño. Es importante señalar que los inversores pueden funcionar dentro de diversos rangos de voltaje de entrada, lo cual determina su compatibilidad con diferentes sistemas fotovoltaicos [22, 23].

**Voltaje de salida:** El voltaje de corriente alterna proporcionado por el inversor corresponde a aquel que se entrega a la red eléctrica o a los dispositivos conectados. Usualmente, este valor es de 120V o 240V [22, 23].

**Protecciones eléctricas:** Los inversores normalmente incorporan medidas de protección contra sobretensiones, cortocircuitos y sobrecalentamiento, asegurando así la seguridad del sistema [22, 23].

### Características físicas del inversor

**Tamaño y peso:** Los inversores pueden presentarse en diferentes tamaños y pesos, abarcando desde modelos pequeños para uso residencial hasta modelos más grandes destinados a aplicaciones comerciales o industriales [22, 23].

**Carcasa:** La carcasa del inversor puede ser de metal o de un plástico resistente a las condiciones climáticas, si se va a colocar en el interior o en el exterior [22, 23].

**Montaje:** Los inversores pueden instalarse en la pared, sobre el suelo o incluso en el interior de un armario eléctrico [22, 23].

#### 1.6.2.4. Dimensionamiento de un inversor

Para elegir adecuadamente un inversor para paneles solares, es fundamental tener en cuenta la potencia total de los paneles, el consumo energético del hogar y la capacidad de sobrecarga del inversor. Este debe contar con una capacidad igual o ligeramente superior a la potencia total de los paneles solares, garantizando así una conversión eficiente de la energía [22, 23].

**Calcular la potencia total de los paneles solares:** Calcular la capacidad total de todos los paneles solares que se encuentran instalados en el sistema. La potencia se cuantifica en vatios (W) o en kilovatios (kW) [22, 23].

**Considerar el consumo de energía:** Analizar el uso de energía en la casa o empresa, especialmente en los momentos de mayor demanda [22, 23].

**Seleccionar el tipo de inversor:** Seleccionar entre inversores monofásicos o trifásicos de acuerdo con la conexión eléctrica del sistema [22, 23].

**Verificar la capacidad de sobrecarga:** Asegurarse de que el inversor sea capaz de soportar aumentos de demanda sin apagarse ni recalentarse [22, 23].

**Considerar la previsión de ampliación:** Si se tiene la intención de instalar más paneles solares en el futuro, seleccionar un inversor con mayor capacidad desde el inicio para prevenir reemplazos costosos [22, 23].

### 1.6.3. Medidor Bidireccional

#### 1.6.3.1. Selección del medidor bidireccional

Al elegir un medidor bidireccional, es fundamental tener en cuenta diversos factores tales como la exactitud, el rango, las características particulares y las verdaderas necesidades de la instalación.

Además, es necesario determinar si optar por la compra o el alquiler, considerando el costo inicial y los servicios que se ofrecen en cada alternativa [24, 25, 26, 27], de acuerdo con la figura 1.7.



Figura 1.7: Medidor bidireccional [2].

### 1.6.3.2. Aspectos a considerar

**Exactitud y Rango:** Un medidor preciso proporciona mediciones confiables de energía. Verificar que tenga un rango adecuado para su instalación, según el voltaje y la corriente [24, 27].

**Características:** Algunos medidores tienen funciones como comunicación, tarifas, control de carga y medición bidireccional. Definir las funciones esenciales para su instalación y elegir un medidor adecuado [24, 25].

### 1.6.3.3. Características eléctricas del medidor bidireccional

**Medición bidireccional:** Evalúa tanto la energía utilizada como la aportada a la red, lo que facilita el cálculo de créditos por generación distribuida [26, 27].

**Precisión:** Los estándares de precisión establecidos como clase 1.0 o 0.5 para la energía activa y clase 2 para la energía reactiva, de acuerdo con la norma IEC 62053-11 [24, 27].

**Medición de energía activa y reactiva:** Observar tanto la energía reactiva (vinculada a la eficiencia de la instalación) como la energía consumida o producida en tiempo real (activa) [24, 27].

**Curvas de carga:** Facilita el almacenamiento de información de consumo y generación en periodos de tiempo establecidos [26, 27].

**Comunicación:** Algunos modelos pueden incorporar características de comunicación (por ejemplo, GPRS, WiFi, Ethernet) para la lectura a distancia de datos o la gestión del medidor [26, 27].

**Protección:** Incorpora protección frente a sobrecargas y otros sucesos que puedan perjudicar el medidor o la instalación [24, 27].

**Normas:** Se ajustan a las regulaciones técnicas pertinentes para los medidores de energía, tales como las normas ANSI [26, 27].

**Funcionamiento con dos juegos de bobinas:** En ciertas situaciones, emplea dos juegos de bobinas para medir la energía en ambos sentidos, creando campos magnéticos que afectan al medidor [24, 27].

#### 1.6.3.4. Características físicas del medidor bidireccional

**Apariencia:** De manera similar a un contador de electricidad convencional, cuenta con una caja que resguarda los elementos internos y las conexiones eléctricas [26, 27].

**Tamaño:** Comúnmente es compacto y está pensado para ser colocado en el mismo lugar que un medidor tradicional [24, 27].

**Materiales:** Cubierta resistente a condiciones meteorológicas adversas, así como protección contra el polvo y la humedad.

**Pantalla:** Incluye una pantalla LCD que exhibe información sobre el consumo y la generación, y puede contar con luces LED que indican el flujo de energía [24, 25].

**Conexiones:** Conectores para la unión de la red eléctrica y del sistema de generación [26, 27].

**Batería interna:** Algunos modelos pueden tener una batería de respaldo que asegura su funcionamiento durante cortes de electricidad [24, 27].

## 1.6.4. Cableado de corriente continua y alterna

### 1.6.4.1. Selección del cable

Es vital tener en cuenta diversos factores al elegir los cables de corriente continua (DC) y alterna (AC) en un sistema fotovoltaico para asegurar la seguridad y eficacia del sistema. Es necesario considerar la corriente nominal, la tensión, la longitud del cable, las circunstancias del entorno y las regulaciones pertinentes [28, 29].

### 1.6.4.2. Selección del cable corriente continua

**Corriente y tensión:** El cable de corriente continua debe tener la capacidad de resistir la corriente máxima producida por los paneles solares y el voltaje nominal del sistema [28, 30].

**Sección transversal:** El grosor del cable (sección transversal) debe ser apropiado para la corriente que circulará por él, previniendo así caídas de tensión desmedidas y sobrecalentamiento [31, 32, 30].

**Caída de tensión:** El descenso de la tensión en el cable de corriente continua no debe exceder el 2% de la tensión nominal del sistema para reducir al mínimo las pérdidas energéticas [30].

**Materiales:** Se aconseja emplear cables con aislamiento resistente a la radiación UV, temperaturas elevadas y humedad, particularmente en instalaciones expuestas a las condiciones climáticas adversas [28].

**Conectores:** Utilizar conectores MC4 adecuados para garantizar una conexión segura y fiable entre los paneles solares y el inversor [29].

### 1.6.4.3. Selección del cable corriente alterna

**Corriente y tensión:** El cable de corriente alterna tiene que ser apto para resistir la corriente y la tensión de salida del inversor [30].

**Sección transversal:** Similar al cable DC, la sección transversal del cable AC debe ser adecuada para la corriente y tensión, evitando caídas de tensión [28, 29].

**Tipo de cable:** Se aconseja emplear cables con aislamiento y una cubierta que resista las condiciones ambientales y las condiciones climáticas adversas [28, 30].

**Normativa:** Los cables de corriente alterna deben acatar las regulaciones eléctricas locales y las leyes de seguridad correspondientes Norma NTE INEN 2538 [31, 32].

#### 1.6.4.4. Características eléctricas

##### Características eléctricas del cable de corriente continua

**Voltaje y Corriente:** La corriente continua producida por los paneles solares es llevada al inversor [31, 32].

**Baja pérdida de energía:** Con el objetivo de reducir las pérdidas por efecto Joule en distancias cortas y medias, mediante conductores de mayor calibre y baja resistencia [29, 31].

**Protección:** Requieren defensa frente a sobrecorrientes (fusibles o interruptores automáticos) y sobrecargas eléctricas [29, 30].

#### 1.6.4.5. Características eléctricas del cable de corriente alterna

**Voltaje y Corriente:** La corriente alterna se desplaza desde el inversor hasta la red eléctrica o las cargas [28, 29].

**Mayor versatilidad:** Modificados para trabajar con distintos sistemas y normas de red [28, 31].

**Protección:** Requieren resguardos frente a corriente excesiva, cortocircuitos y sobretensión [28, 29].

#### 1.6.4.6. Características físicas del cable de corriente continua

**Conductor:** Normalmente de cobre, con gran conductividad y flexibilidad, aunque en ocasiones se recurre a aluminio para disminuir gastos en instalaciones de gran envergadura [28, 30].

**Aislamiento:** Diversas capas de aislamiento resistente a las condiciones climáticas, los rayos UV, el calor y la humedad [32, 30].

**Flexibilidad:** Los cables de corriente continua suelen tener mayor flexibilidad para simplificar la instalación en diversas configuraciones [28, 30].

#### 1.6.4.7. Características físicas del cable de corriente alterna

**Conductor:** Similares a los cables de corriente continua, aunque pueden variar en calibres dependiendo de la potencia y la distancia [28, 29].

**Aislamiento:** Además, es resistente a las condiciones climáticas adversas, pero se ha ajustado a las condiciones particulares de la red eléctrica [32, 30].



Figura 1.8: Cableado electrónico en la instalación fotovoltaica [5].

### 1.6.5. Tipo de protecciones eléctricas en corriente continua y alterna

#### 1.6.5.1. Protecciones en corriente continua

**Fusibles:** Los fusibles se emplean para resguardar los cables y elementos del sistema fotovoltaico de voltajes excesivos y cortocircuitos. Se aconseja uno por cada par de secuencias, determinando su valor de acuerdo a la corriente máxima de corte [33, 34].

**Interruptores Termomagnéticos:** Salvaguardan el circuito de corriente continua de sobrecargas, tanto en la sección de los paneles como en la conexión con el inversor [35, 36].

**Cajas Combinadoras:** Promueven la unión de múltiples secuencias de paneles solares, simplificando el cableado y aumentando la fiabilidad de la instalación [35, 34].

**Supresores de Sobretensiones:** Salvaguardan los elementos eléctricos del sistema de fluctuaciones en el voltaje provocadas por rayos o sobrecargas eléctricas [33, 34].

**Puesta a Tierra:** Es crucial para la protección, enlaza los elementos eléctricos del sistema con la tierra, desviando corrientes en caso de avería y resguardando contra impactos eléctricos [35, 34].

**Interruptores de Falla por Arco:** Detectan y previenen incendios causados por arcos eléctricos en el circuito de corriente continua [33, 34].

#### 1.6.5.2. Protecciones en corriente alterna

**Interruptores Termomagnéticos:** Protegen el circuito de corriente alterna a la salida del inversor contra sobrecorrientes y cortocircuitos [35, 34].

**Interruptores Diferenciales (ID o RCD):** Protegen contra fallas de aislamiento, detectando corrientes de fuga a tierra y abriendo el circuito para evitar riesgos de electrocución [33, 34].

**Supresores de Sobretensiones:** Protegen el circuito de alterna contra sobretensiones, especialmente en sistemas conectados a la red [35, 34].

#### 1.6.5.3. Características eléctricas del equipo de protección

**Tensión nominal:** Indica el voltaje para el que está diseñado el dispositivo [33, 34].

**Corriente nominal:** La corriente máxima que puede conducir de forma segura [35, 33].

**Capacidad de corte:** La corriente máxima que el dispositivo puede interrumpir de forma segura [35, 36].

**Curva de disparo:** Describe la relación entre la corriente y el tiempo de disparo en un interruptor magnetotérmico o fusible [33, 34].

**Resistencia de aislamiento:** Mide la capacidad del dispositivo para resistir el paso de corriente a través de su aislamiento [35, 34].

**Tiempo de respuesta:** El tiempo que tarda el dispositivo en actuar ante una falla [33, 34].

#### 1.6.5.4. Características físicas del equipo de protección

**Forma y tamaño:** Los tamaños y capacidades de los dispositivos de protección varían. Los interruptores son compactos, mientras que los DSP son más grandes [35, 34].

**Materiales:** Utilizan materiales aislantes y conductores según su función. Los interruptores y fusibles suelen tener carcasas de plástico o materiales aislantes, con contactos metálicos para la conducción de corriente [33, 34].

**Conexiones:** Se conectan al circuito eléctrico mediante bornes, asegurando una conexión segura y confiable [35, 36].

## 1.7. Tipos de configuraciones

### 1.7.1. Sistema Fotovoltaico Conectado a red

Un sistema fotovoltaico conectado a la red es un sistema de energía solar que se vincula directamente a la red eléctrica pública. Utiliza paneles solares para generar electricidad en corriente continua (CC), que luego, mediante un inversor, se convierte en corriente alterna (CA) para su uso doméstico o comercial, y el excedente se inyecta a la red eléctrica [19, 20], como apoyo visual, véase la figura 1.9.

**Ahorro en la factura eléctrica:** Generar energía solar disminuye o elimina la compra de electricidad de la red, ahorrando significativamente en los costos mensuales.

**Energía renovable y sostenible:** Los sistemas fotovoltaicos aprovechan la energía solar, una fuente limpia e inagotable, para reducir la dependencia de combustibles fósiles y la huella de carbono.

**Inversión rentable:** Aunque la inversión inicial en paneles solares es considerable, el ahorro en la factura eléctrica y las subvenciones suelen permitir una rápida recuperación de la inversión.

**Mayor fiabilidad:** Al estar conectado a la red, el sistema garantiza un suministro eléctrico constante, complementando la energía solar con la red eléctrica cuando la producción es baja.

**Reducción de emisiones:** Generar energía limpia disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, beneficiando al medio ambiente y combatiendo el cambio climático.

**Independencia energética:** Un sistema fotovoltaico permite ser energéticamente autosuficiente, reduciendo la dependencia de las eléctricas y protegiéndote de las subidas de precios.

**Incremento del valor de la propiedad:** Un sistema fotovoltaico puede aumentar el valor de la propiedad gracias a su percepción como inversión sostenible y energéticamente eficiente.

**Posibilidad de compensación de excedentes:** En algunos casos, se puede recibir compensación por la energía que genera y vierte a la red, lo que reduce aún más la factura eléctrica.

**Menor mantenimiento:** Los sistemas fotovoltaicos son fáciles de mantener, requiriendo generalmente solo la limpieza periódica de los paneles.

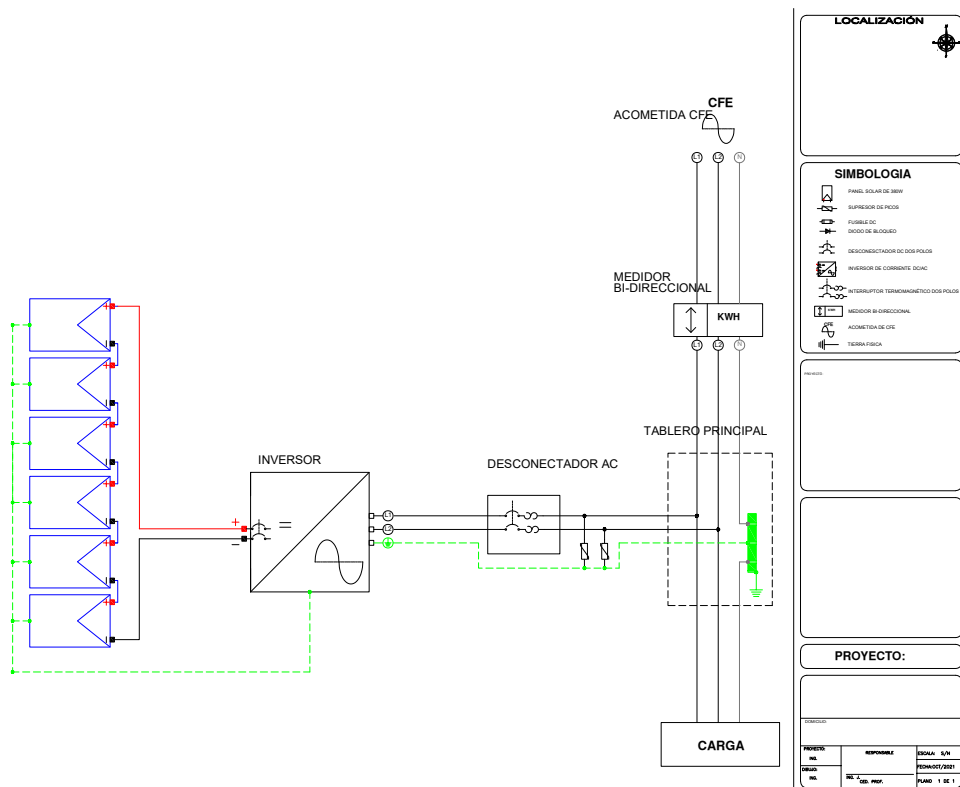


Figura 1.9: Diagrama Unifilar del sistema fotovoltaico.

### 1.7.2. Sistemas aislados (“off-grid”)

Los sistemas aislados (“off-grid”) son sistemas de generación de energía autónomos que no dependen de la red eléctrica pública. Funcionan capturando la luz solar con paneles fotovoltaicos y almacenando el exceso de energía en baterías para su uso durante la noche o en días nublados. Estos sistemas son ideales para ubicaciones remotas sin acceso a la red eléctrica y proporcionan independencia energética total [5].

### 1.7.3. Sistemas híbridos

Combinan energía solar fotovoltaica, posiblemente otras fuentes (ej. generadores diésel, eólica) y baterías para asegurar mayor fiabilidad. Estos sistemas son útiles en zonas donde la red es débil o se desea independencia energética [3].

### 1.7.4. Parámetros de diseño

Para diseñar un sistema fotovoltaico eficiente es fundamental considerar ciertos parámetros técnicos. [37].

- Potencia pico (kWp o kW): Es la potencia nominal máxima que un sistema de módulos puede entregar bajo condiciones estándar de prueba (STC). En el diseño se debe estimar cuántos kWp se necesitan para cubrir la demanda del sitio. [37].
- Eficiencia del módulo del sistema: La eficiencia del módulo es la proporción de radiación solar se convierte en electricidad. También es importante la eficiencia global del sistema, considerando pérdidas por temperatura, sombras, cableado, suciedad, etc. [37].
- Temperatura de operación: La temperatura afecta negativamente la eficiencia de los módulos: mayor temperatura → menor rendimiento eléctrico. [37].
- Factor de rendimiento (Performance Ratio, PR): El PR es una métrica que relaciona la energía realmente generada versus la energía que podría haber sido generada bajo condiciones ideales, ajustadas por radiación [37].

## 1.8. Demanda energética

La demanda energética se refiere a la cantidad de energía eléctrica que los usuarios requieren en un período determinado. Esta demanda depende del tipo de actividad (residencial, comercial, industrial), del clima, de los hábitos de consumo y de las tecnologías utilizadas. conocer la demanda energética permite planificar, dimensionar y optimizar sistemas de generación y distribución, especialmente cuando se integran tecnologías renovables como la solar fotovoltaica [37].

El primer paso esencial es evaluar el consumo energético para determinar la capacidad necesaria del sistema fotovoltaico. Deben revisarse las facturas eléctricas de los últimos 12 meses para entender el uso mensual y anual de energía. Es importante identificar patrones de consumo, considerando fluctuaciones estacionales odiurnas. Se deben considerar futuros cambios en el uso de energía, como la adición de nuevos electrodomésticos. También hay que verificar la potencia contratada, especialmente en sistemas de generación distribuida, para evitar restricciones en la producción solar. Se debe calcular diariamente el consumo de energía promedio. Para identificar la demanda que los paneles deben cubrir, es útil hacer una lista de elementos que incluya cantidad y potencia. Si varios elementos funcionan a diferentes horas, deben registrarse como elementos independientes [38, 39]. Una lista de demanda, se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Elementos considerados para el cálculo de la demanda energética

Elemento	Cantidad	Potencia (W)	Horas/día	Consumo (Wh/día)
Foco	5	20	2	200
Foco	2	30	1	60
Lámparas	3	50	3	450
Nevera	2	1500	4	12000
Extractor	1	800	1	800
Computador	1	180	2	360
Televisor 50"	1	180	1	180
Televisor 60"	1	180	1	180
Plancha	1	180	2	360
Radio	1	180	5	900
Consola de juegos	1	65	6	390
Laptop	1	75	2	150
Licuadaora	1	85	4	340
Lavadora	1	1200	1	1200
Waflera	1	800	2	1600

## 1.9. Análisis estocástico aplicado a la energía solar

El análisis estocástico es una herramienta fundamental para estudiar y modelar fenómenos energéticos que presentan incertidumbre, variabilidad y comportamiento no determinístico, como ocurre con la radiación solar, la nubosidad y la producción solar fotovoltaica. Su aplicación permite estimar rangos de generación, evaluar riesgos y optimizar el desempeño de sistemas solares en distintos escenarios [40].

### **1.9.1. Definición de procesos estocásticos y su aplicación en ingeniería energética**

Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias que evoluciona en el tiempo o el espacio de forma incierta. A diferencia de modelos determinísticos, que asumen valores exactos, los modelos estocásticos permiten describir y predecir comportamientos con variabilidad natural [40].

En ingeniería energética, los procesos estocásticos se utilizan para:

- Modelar la variabilidad de la radiación solar a lo largo del día o entre estaciones [40].
- Predecir la generación de energía fotovoltaica considerando incertidumbre climática [40].
- Estimar la probabilidad de fallas o interrupciones en el sistema [40].
- Diseñar sistemas híbridos (solar, diésel, solar, baterías) con mayor precisión [40].
- Evaluar riesgos financieros asociados a fluctuaciones en la producción energética [40].

### **1.9.2. Distribuciones probabilísticas**

Para describir las fluctuaciones de variables solares como irradiancia, velocidad de viento para sistemas híbridos o producción energética, se suelen emplear algunas distribuciones específicas: [41].

#### **1.9.2.1. Distribución Normal**

Útil para fenómenos que presentan variabilidad alrededor de una media. Aplicable en análisis de errores de medición o pequeñas fluctuaciones de irradiancia. No siempre adecuada para datos solares porque puede asignar probabilidades a valores negativos [41].

#### **1.9.2.2. Distribución Weibull**

Muy común en análisis de viento, pero también se usa en algunas aplicaciones solares. Adecuada para datos que presentan colas largas y gran variabilidad [41].

### 1.9.2.3. Distribución Beta

Ideal para variables acotadas en un intervalo  $[0,1]$ . Se utiliza en modelar irradiancia normalizada o fracción de generación. Permite representar perfiles con alta variabilidad diaria [41].

### 1.9.2.4. Distribución Log-normal

Describe variables cuyo logaritmo sigue la distribución normal. Adecuada para irradiancia solar real y potencia generada, porque solo toma valores positivos y presenta asimetría (días nublados vs días soleados) [41].

La distribución Log-normal y Beta suelen ofrecer los mejores ajustes para la irradiancia global horizontal (GHI), principalmente en regiones con alta nubosidad [41].

## 1.10. Introducción al método de simulación Monte Carlo

La técnica numérica conocida como método de simulación Monte Carlo está fundamentada en principios probabilísticos y posibilita el análisis del funcionamiento de sistemas complejos a través de la creación de diversos escenarios al azar. Para conseguir resultados que representen estadísticamente el sistema bajo análisis, su operación se basa en la repetición de experimentos simulados, empleando variables de entrada modeladas como aleatorias [41].

En la implementación del método Monte Carlo, el primer paso es especificar con claridad las variables que tienen incertidumbre y el sistema a examinar. La temperatura del ambiente, la radiación solar, el rendimiento de los equipos y la demanda eléctrica son algunas de las variables que se consideran en los sistemas energéticos.

Cada una de estas variables se expresa como una variable aleatoria, cuya variabilidad se explica a través de una distribución probabilística apropiada. Por ejemplo, se pueden crear modelos de la radiación solar usando distribuciones Beta o normal, a la vez que las distribuciones normal o empíricas basadas en datos históricos sirven para representar la demanda de energía eléctrica [41].

Después de reconocer las variables aleatorias, se escogen las distribuciones probabilísticas que se adapten más a los datos verdaderos del sistema. Este ajuste es frecuentemente efectuado con base en

datos históricos y mediante el uso de técnicas estadísticas como la estimación de parámetros o las pruebas de bondad de ajuste.

Es esencial escoger la distribución apropiada, porque esta define cuán representativos son los escenarios producidos. Un análisis puede perder precisión si se distribuye de manera incorrecta, lo que puede conducir a resultados sesgados y poco fiables [41].

El método Monte Carlo se basa en generar números aleatorios, por lo general utilizando algoritmos de computadora que se conocen como generadores pseudoaleatorios. Estos números, que inicialmente tienen una distribución uniforme, se modifican después para adecuarse a las distribuciones probabilísticas escogidas para cada variable.

Este procedimiento hace posible la creación de valores aleatorios para la demanda, la temperatura o la radiación solar en cada iteración de la simulación, lo que emula la variabilidad natural del sistema energético [41].

Cada conjunto de valores aleatorios que se producen forma un escenario de simulación. El modelo del sistema energético se aplica para cada caso, determinando variables de salida como la energía generada, la condición de carga de las baterías, la pérdida del sistema o la energía no entregada.

Este procedimiento se repite muchas veces, desde cientos hasta miles o incluso millones de iteraciones, dependiendo de la precisión necesaria y del poder computacional disponible. Cuantas más iteraciones se realicen, más fiable será estadísticamente el resultado [41].

Los resultados que se obtienen tras las simulaciones son analizados desde el punto de vista estadístico. El método Monte Carlo ofrece distribuciones de probabilidad para las variables de salida, en vez de un solo valor determinístico. Con base en estas distribuciones, es posible determinar parámetros estadísticos como la media, la probabilidad de que ocurran eventos particulares, los percentiles y la desviación estándar. Esto posibilita, en sistemas de energía, determinar la confiabilidad del suministro, la probabilidad de que ocurran fallos y el riesgo vinculado a la estructura del sistema [41].

# Capítulo 2

## DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

### MEDIANTE ANÁLISIS ESTOCÁSTICO

#### 2.1. Descripción del Lugar de Estudio

##### 2.1.1. Localización Geográfica, Coordenadas y características climáticas

La zona de estudio se localiza en la región interandina del Ecuador, específicamente en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, con coordenadas geográficas latitud  $-2.884360^\circ$  y longitud  $-78.967850^\circ$ , a una altitud aproximada de 2.550 m sobre el nivel del mar.

## 2.1.2. Datos Meteorológicos

Tabla 2.1: Irradiancia Solar [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] del sitio seleccionado

<b>Hora</b>	<b>Irradiancia Dia 1</b>	<b>Irradiancia Dia 2</b>
01:00	0	0
02:00	0	0
03:00	0	0
04:00	0	0
05:00	0	0
06:00	0	0
07:00	38,2	18,58
08:00	229,52	121,85
09:00	450,25	242,6
10:00	613,62	388,65
11:00	674,5	434,17
12:00	724,62	595,7
13:00	735,4	666,33
14:00	637,92	580,03
15:00	450,58	499,85
16:00	386,6	286,15
17:00	242,15	291,12
18:00	93,78	75,72
19:00	0	0
20:00	0	0
21:00	0	0
22:00	0	0
23:00	0	0
24:00	0	0

Tabla 2.2: Temperatura C del sitio seleccionado

<b>Hora</b>	<b>Temperatura 1 (°C)</b>	<b>Temperatura 2 (°C)</b>
01:00	11.11	11.33
02:00	10.67	11.83
03:00	10.37	12.43
04:00	10.18	12.40
05:00	10.25	12.00
06:00	10.30	11.51
07:00	10.60	11.53
08:00	12.12	13.07
09:00	13.55	14.49
10:00	14.90	16.31
11:00	16.37	17.99
12:00	17.83	18.88
13:00	18.58	19.25
14:00	18.03	19.03
15:00	16.85	18.37
16:00	15.77	17.48
17:00	14.93	16.47
18:00	14.15	15.14
19:00	13.08	13.58
20:00	12.30	12.83
21:00	11.72	12.55
22:00	11.33	12.29
23:00	11.07	12.22
24:00	11.01	12.18

Las Tablas 2.1 y 2.2 presentan una muestra representativa de los datos meteorológicos correspondientes a la irradiancia solar y la temperatura ambiente del lugar de estudio, respectivamente. En ambas tablas se incluyen los valores registrados durante dos días, con una resolución horaria de 24 horas, con el fin de ilustrar el comportamiento diario de estas variables. Es importante señalar que, aunque en el documento únicamente se presentan estos datos a modo de ejemplo debido a limitaciones de espacio, el análisis completo se realizó utilizando la información correspondiente a los 365 días del año, considerando igualmente la variación horaria de cada día. Estos datos completos fueron empleados en el análisis estadístico y en la aplicación del modelo estocástico mediante simulaciones de Monte Carlo, garantizando así que el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se base en condiciones climáticas reales y representativas del sitio de estudio.

## 2.2. Metodología de Recolección y Procesamiento de Datos

La recopilación y el procesamiento de datos es una etapa fundamental para el correcto modelado estocástico de la radiación solar y la demanda de energía. Se necesita una disponibilidad robusta de datos junto con un tratamiento para asegurar la precisión de las simulaciones de Monte Carlo aplicadas. Para caracterizar las condiciones reales de un sitio de análisis, incluimos información meteorológica y energética de fuentes oficiales dentro de esta investigación.

### 2.2.1. Periodo de Estudio y Frecuencia Temporal de los Datos (horaria, diaria, mensual)

Se eligió un período de estudio representativo de un año completo para la caracterización de la irradiancia solar y la demanda energética, con el fin de cubrir las variaciones estacionales.

El análisis se realizó utilizando diferentes niveles de resolución temporal:

- a) **Datos Horarios:** para capturar la variabilidad estocástica de la irradiancia solar y la demanda dentro de cada día. Esta resolución es para determinar la generación fotovoltaica y evaluar el balance energético hora por hora.
- b) **Datos Mensuales:** se aplican para analizar patrones de variación estacional y para la comparación

con valores de irradiación solar global publicados por instituciones nacionales, como el INAMHI.

El uso de estas frecuencias temporales permite un análisis integral del comportamiento energético del sistema.

### **2.2.2. Identificación de Valores Atípicos (outliers)**

Se realizó para las observaciones horarias de parámetros con valores físicamente imposibles, irradiancia superior al valor esperado para la región (mayor de  $1200 \text{ W/m}^2$ ), o saltos abruptos no consistentes con el comportamiento meteorológico del área, los cuales fueron identificados y descartados.

### **2.2.3. Tratamiento de Datos Vacíos (missing data)**

El manejo de los valores faltantes se trataron mediante:

- Interpolación lineal en intervalos cortos (hasta 3 horas).
- Sustitución con el promedio horario para el mismo período del mes cuando las brechas eran prolongadas.
- Eliminación de días completos cuando la continuidad de datos no cumplía con el estándar mínimo del análisis estocástico.

### **2.2.4. Verificación Cruzada con Datos Mensuales Oficiales**

Los promedios diarios y mensuales logrados se cruzaron con los datos de irradiancia mensual recopilados de las estaciones meteorológicas más cercanas al sitio de estudio, para compararlos con los perfiles regionales comunes.

## **2.3. Análisis Estadístico y Ajuste de Distribuciones**

En esta sección, se lleva a cabo el análisis estadístico de la serie temporal de irradiancia y demanda de energía, junto con su ajuste a distribuciones probabilísticas (particularmente la distribución Normal) y la validación de los modelos obtenidos. Los resultados se integran con simulaciones de Monte Carlo.

### 2.3.1. Análisis de la Irradiancia y Demanda Energética

Antes de aplicar cualquier modelo, se deben conocer las características básicas de los datos. Para esto se realiza un análisis descriptivo, que incluye:

- **Promedio (media):** El valor promedio de los datos.
- **Mediana:** indica el punto medio de la distribución.
- **Desviación estándar:** indica cuánto varían los valores respecto a la media.
- **Valores máximos y mínimos:** indican el rango de los datos.
- **Coefficiente de variación (CV):** da la variabilidad relativa.
- **Número de datos (n):** total de observaciones.

Junto con los cálculos, se recomienda representar los datos mediante el siguiente gráfico:

**Histogramas:** demuestran cómo se distribuyen los valores (por ejemplo, si existe una alta frecuencia días nublados o soleados).

### 2.3.2. Ajuste de Distribuciones Probabilísticas

Una vez que se comprende el comportamiento general de los datos, se busca una distribución de probabilidad que se ajuste a ellos. Esto es para describir matemáticamente la forma en que se comportan la irradiancia y la demanda. Se tiene tres posibles elecciones de preferencia a continuación:

1. **Distribución Normal:** se utiliza para datos simétricos (forma de campana).
2. **Distribución Log-normal o Gamma:** se utilizan cuando los datos son siempre positivos y tienen colas largas hacia valores altos.
3. **Distribución Weibull:** útil para representar recursos naturales como la radiación o el viento.

## 2.4. Selección de Paneles Solares

Para seleccionar los paneles solares se considera el consumo eléctrico, área disponible, eficiencia del panel, ubicación de la instalación, clima, garantía y credibilidad del fabricante al seleccionar paneles. Analiza tu consumo anual, la potencia contratada y el espacio disponible. Verifica la eficiencia del panel, la potencia máxima y el tipo de celdas solares que utiliza. Presta especial atención a la garantía y la fiabilidad del fabricante [19, 20, 21].

## 2.5. Modelo del Sistema Fotovoltaico

Esta sección presenta un modelo tradicional (no probabilístico) para estimar la energía producida por el sistema fotovoltaico.

En primer lugar para dimensionar el sistema fotovoltaico se debe determinar la demanda energética de la vivienda, en este caso se observa en la tabla 1.1 donde se muestra la demanda obteniendo un valor de  $E_d=11880$  wh/día

Posteriormente se calcula la hora solar pico HSP tomando como base la Irradiancia de la tabla 2.1 por lo cual tenemos una hora solar pico de  $4.74$  kWh/m<sup>2</sup>/día.

Además se debe considerar los factores de pérdidas como: inversor, temperatura, suciedad, cableado, regulador. Por lo cual se usa un factor de rendimiento típico Performance Ratio (0.75-0.80) [5]

Para el cálculo de la potencia del sistema fotovoltaico se emplea la siguiente ecuación (2.1):

$$P_{fv} = \frac{E_d}{HSP \cdot Pr} \quad (2.1)$$

donde

★  $E_d$  → Demanda energética diaria (Wh/día).

★  $P_{fv}$  → Potencia fotovoltaica requerida (W).

★ HSP → Hora solar pico (kWh/m<sup>2</sup>/día).

★ Pr → Performance Ratio.

$$P_{fv} = \frac{11880}{4,74 \cdot 0,8} = 3132,91 \text{ W}$$

para obtener el número de paneles necesarios, se tiene a partir de la ecuación (2.2):

$$N_p = \frac{P_{fv}}{\text{HSP} \cdot P_{mod}} \quad (2.2)$$

$$N_p = \frac{3132,91}{545} = 5,74 \text{ paneles}$$

De acuerdo a la metodología determinista se recomienda que el numero de paneles se suba al inmediato superior, dando como resultado 6 paneles para cubrir la energética de la vivienda.

### 2.5.1. Inclinación de los Paneles Solares

La inclinación del panel solar está determinada principalmente por la latitud del sitio y puede ajustarse a lo largo del año para maximizar los beneficios. Además, los ángulos también pueden ajustarse por temporada para mejorar la generación en invierno o verano. A la hora de calcular la pendiente de los paneles se deben tener en cuenta lo siguiente:

- Para maximizar la producción anual: La inclinación es igual a la latitud.
- Para maximizar la producción en invierno: La inclinación es igual a la latitud + 15°.
- Para maximizar la producción en verano: La inclinación es igual a la latitud - 15°.

### 2.5.2. Temperatura De Los Módulos Fotovoltaicos

El rendimiento de los paneles solares está influenciado por su temperatura. La temperatura de un panel solar se determina utilizando la temperatura ambiente, la irradiación solar y el coeficiente de temperatura del panel. La temperatura del panel ( $T_c$ ) está asociada con la temperatura ambiente ( $T_a$ ), la irradiación solar ( $G$ ) y la temperatura nominal de operación de la célula de un panel (NOCT) [42, 43], como se expresa en la ecuación (2.3).

$$T_c = T_a + \frac{(NOCT - 20)}{800} \cdot G \quad (2.3)$$

donde:

- ★  $T_c$  → Temperatura de la célula fotovoltaica ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ★  $T_a$  → Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ★ NOCT → Temperatura de operación nominal de la célula ( $^{\circ}\text{C}$ ), generalmente alrededor de  $45^{\circ}\text{C}$  para paneles estándar, como indica SunFields.
- ★  $G$  → Irradiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

El coeficiente de temperatura es un parámetro crucial que ilustra cuánto cambia la potencia de un panel solar por cada aumento de un grado Celsius en la temperatura. Como generalmente está entre 0.29 y 0.5 %  $^{\circ}\text{C}$ , es decir, por cada aumento de  $10^{\circ}\text{C}$  la potencia del panel puede reducirse entre un 2.9 % y un 5 % [42, 43].

A modo de ejemplo, se realiza el cálculo de la temperatura del panel solar para una hora específica, utilizando los valores de temperatura ambiente e irradiancia correspondientes a dicho intervalo horario. Para ello, se sustituyen estos valores en la Ecuación (2.3), obteniéndose la temperatura del panel para la condición considerada.

$$T_c = 11,11 + \left( \frac{41 - 20}{800} \right) = 11,34^{\circ}\text{C}$$

### 2.5.3. Potencia Generada por los Módulos

La cantidad de energía que genera un panel solar cada día está influenciada por distintos factores, los cuales pueden ocasionar variaciones significativas en su rendimiento. Entre los más relevantes se encuentran la localización geográfica, la estación del año, el ángulo de inclinación del panel, la intensidad de la radiación solar y la existencia de sombras o nubosidad. Las llamadas “horas pico solares” corresponden a los períodos en los que la radiación solar alcanza los  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ; a mayor número de estas horas, mayor será la producción de energía [44, 45].

Para determinar la potencia del panel se debe tener en cuenta la ecuación (2.4):

$$P_{\text{panel}} = G \cdot (1 + \beta_T(T_c - T_{STC})) \cdot \eta \quad (2.4)$$

donde:

- $G \rightarrow$  Irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $\beta_T \rightarrow$  Coeficiente de temperatura de la potencia ( $1/^\circ\text{C}$ )
- $T_c \rightarrow$  Temperatura de la celda ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_{STC} \rightarrow$  Temperatura estándar de referencia ( $25^\circ\text{C}$ )
- $\eta \rightarrow$  Eficiencia del panel

Tabla 2.3: Parámetros del panel FV de 545 W

Parámetro	Símbolo	Valor
Coef. temp. potencia	$\beta_T$	$-0,0036 (1/^\circ\text{C})$
Temp. estándar	$T_{STC}$	$25^\circ\text{C}$
Eficiencia	$\eta$	$21,09\%$
Potencia nominal	$P_{STC}$	$545 \text{ W}$

La Tabla 2.3 muestra los parámetros eléctricos y térmicos del panel fotovoltaico de 545 W considerados en este estudio, tales como el coeficiente de temperatura de la potencia, la temperatura estándar de referencia, la eficiencia y la potencia nominal. Estos parámetros son fundamentales para la estimación del comportamiento del panel bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura ambiente.

Tabla 2.4: Potencia del panel en un día típico

<b>Hora</b>	$T_C$ (°C)	$P_{panel}$ (W)
07:00	11,34	518,19
08:00	18,12	531,51
09:00	26,46	547,87
10:00	34,27	563,39
11:00	40,49	575,39
12:00	44,28	582,83
13:00	45,14	584,53
14:00	43,60	581,49
15:00	39,78	574,01
16:00	33,73	562,14
17:00	26,51	547,97
18:00	18,74	532,73

La Tabla 2.4 presenta los resultados del cálculo horario de la temperatura del panel fotovoltaico y la potencia generada durante un día completo de 24 horas. Estos valores se obtienen a partir de la aplicación de la ecuación de temperatura del panel, utilizando los datos horarios de irradiancia solar y temperatura ambiente, junto con los parámetros técnicos del panel fotovoltaico previamente definidos. El análisis horario permite evaluar la variación de la temperatura del panel a lo largo del día y su influencia directa sobre la potencia producida, proporcionando una referencia del comportamiento real del panel bajo condiciones operativas variables. Este procedimiento se replica posteriormente para el total de los días del año en el proceso de simulación, aunque en la tabla se presenta únicamente un día a modo ilustrativo.

#### 2.5.4. Cálculo del Inversor

**Potencia del Inversor:** La capacidad del inversor debe ser igual o mayor que la potencia total de los dispositivos conectados, teniendo en cuenta un margen de seguridad (que varía entre 1.2 y 1.5)

[22, 23], como se indica la siguiente ecuación (2.5).

$$P_i = P_t \cdot F_s \quad (2.5)$$

donde:

- $P_i$  → Potencia del inversor (W).
- $P_t$  → Potencia total de los equipos (W).
- $F_s$  → Factor de seguridad.

**Voltaje del Inversor:** El voltaje del inversor debe ser adecuado para coincidir con el voltaje de las baterías del sistema [22, 23].

### 2.5.5. Pérdidas por el Tipo de Cableado

En un sistema de energía solar, los cables se clasifican en dos categorías principales: corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Las ecuaciones para el cableado DC se centran en calcular la sección del cable para minimizar las pérdidas de energía debido a la resistencia del cable, mientras que las ecuaciones para el cableado AC consideran factores como la corriente, el voltaje y la longitud del cable para asegurar una transmisión de energía eficiente [28, 29, 31, 32, 30].

### 2.5.6. Cálculo del conductor de Corriente Continua (CC)

**Cálculo de la sección del cable (S):** Se emplea para establecer el tamaño correcto del cable con el fin de reducir las pérdidas provocadas por la disminución de la tensión [28, 29, 31, 32, 30], la ecuación 2.6 indica los datos necesarios para realizar el cálculo.

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I_{cc}}{\Delta V \% \cdot U_n \cdot k} \quad (2.6)$$

donde:

- $S$  → Sección del cable ( $\text{mm}^2$ ).
- $L$  → Longitud del cable (m).

- $I_{cc}$  → Corriente de cortocircuito del panel solar (A).
- $\Delta V\%$  → Caída de tensión permitida (%); (3 % para la conexión entre panel y regulador).
- $U_n$  → Tensión nominal del sistema (V).
- $k$  → Factor de corrección que depende de la temperatura ambiente y tipo de cable.

El calibre del conductor se determina a partir de la corriente que circula por el sistema, ya que un dimensionamiento adecuado permite minimizar las pérdidas eléctricas y garantizar la seguridad de la instalación. En este estudio, el cálculo del calibre se realizó empleando la Ecuación 2.6, la cual relaciona la corriente nominal del sistema con los criterios de diseño establecidos para la conducción eléctrica. Mediante la aplicación de esta ecuación se selecciona un conductor capaz de soportar la corriente de operación sin sobrecalentamiento, asegurando el correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico y el cumplimiento de las condiciones técnicas requeridas. Los resultados obtenidos permiten definir un calibre adecuado para las condiciones de operación del sistema

$$S = \frac{2 \cdot 30 \cdot 13,93}{3\% \cdot 110} = 253,27mm^2$$

**Pérdida de Potencia en el Cable:** El objetivo es estudiar el rendimiento actual del sistema y verificar que las pérdidas de energía del mismo estén dentro de límites aceptables [28, 29, 31, 32, 30], se observa en la ecuación 2.7 .

$$P_p = I^2 \cdot R \tag{2.7}$$

donde:

- $P_p$  → Pérdida de potencia (W).
- $I$  → Intensidad de corriente (A).
- $R$  → Resistencia del cable en ( $\Omega$ ).

### 2.5.7. Cálculo del conductor de Corriente Alterna (AC)

**Cálculo de la Sección del Cable (S):** Al igual que en el cálculo de corriente continua, se considera la corriente nominal del inversor así como algunos otros factores de la corriente alterna [28, 29, 31, 32, 30], como indica la ecuación 2.8.

$$S = \frac{I \cdot L \cdot \cos(\phi)}{\Delta V \cdot k} \quad (2.8)$$

donde:

- S → Sección del cable (mm<sup>2</sup>).
- L → Longitud del cable (m).
- I → Corriente nominal del inversor (A).
- ΔV% → Caída de tensión permitida (%).
- cos(φ) → Factor de Potencia.
- k → factor de corrección que depende de la temperatura ambiente y tipo de cable.

El dimensionamiento del calibre del conductor en corriente alterna, correspondiente al tramo ubicado a la salida del inversor, se realizó considerando la corriente que circula en el lado AC del sistema fotovoltaico. Para este propósito, se empleó la Ecuación 2.8, la cual permite calcular la corriente alterna en función de la potencia suministrada por el inversor y el nivel de tensión de operación. A partir del valor de corriente obtenido, se seleccionó el calibre del conductor adecuado, garantizando que este pueda soportar las condiciones de operación sin sobrecalentamiento y manteniendo las pérdidas eléctricas dentro de límites aceptables. Este procedimiento asegura la correcta conducción de la energía generada hacia las cargas o el punto de conexión, contribuyendo a la seguridad y confiabilidad del sistema fotovoltaico.

$$S = \frac{13,93 \cdot 30 \cdot 0,95}{\frac{3}{100}} = 397 \text{ mm}^2$$

### 2.5.8. Determinación del Contador Bidireccional

El tamaño de un medidor bidireccional se determina teniendo en cuenta la capacidad del sistema fotovoltaico y las demandas energéticas del usuario. Es necesario considerar la potencia máxima del sistema fotovoltaico y las necesidades energéticas del hogar para elegir un medidor con características suficientes para gestionar tanto la energía utilizada como la energía producida y enviada a la red [24, 25, 26, 27].

**Cálculo del Medidor Bidireccional:** Un medidor bidireccional es esencial para los sistemas de autoconsumo fotovoltaico, ya que permite a los usuarios producir su propia electricidad y, en muchos casos, vender el excedente a la red [24, 25, 26, 27].

Refleja tanto la energía que se importa como la energía que se exporta. Para calcular el balance neto de energía, se puede aplicar la siguiente ecuación reducida [24, 25, 26, 27], se observa en la ecuación 2.9.

$$D_n = E_i - E_e \quad (2.9)$$

donde:

- $D_n$  → Demanda neta (kWh).
- $E_i$  → Energía importada (kWh).
- $E_e$  → Energía exportada (kWh).

$$D_n = 66,358167 - 396,69101 = -330,332843 \text{ Wh/h}$$

Si el resultado es positivo, indica que se consumió más energía de la red de la que se generó y se inyectó de la red. Si el resultado es negativo, indica que se generó más energía con los paneles solares de la que se consumió, y el excedente se envió a la red [24, 25, 26, 27].

### 2.5.9. Consideraciones del Sistema Fotovoltaico

a) **Capacidad del Sistema Fotovoltaico:** La mayor potencia de los paneles solares definirá la cantidad máxima de energía que pueden producir y, por lo tanto, la corriente que el medidor debe ser

capaz de gestionar [24, 25, 26, 27].

**b) Consumo Energético del Hogar:** Es esencial entender la demanda de energía del hogar para asegurar que el medidor pueda gestionar tanto la energía utilizada como la energía producida por los paneles solares [24, 25, 26, 27].

**c) Normativa Local:** Las regulaciones de la compañía eléctrica local pueden establecer requisitos específicos para la capacidad del medidor bidireccional [24, 25, 26, 27].

### 2.5.10. Pérdidas del Rendimiento del Sistema por Suciedad

El polvo y la suciedad reducen la cantidad de luz que llega al panel. Dependiendo del ambiente y mantenimiento, las pérdidas pueden estar entre 2 % y 6 %:

$$E_{soi} = E_{cab} \cdot n_{soi} \quad (2.10)$$

donde:

- $E_{soi}$  → Energía entregada (kWh).
- $E_{cab}$  → Energía generada (kWh).
- $n_{soi}$  → Eficiencia del sistema.

Las pérdidas de rendimiento del sistema fotovoltaico asociadas a la suciedad se producen principalmente por la acumulación de polvo, partículas y otros contaminantes sobre la superficie de los módulos, lo que reduce la radiación solar efectiva que incide sobre las celdas. En este estudio, estas pérdidas se cuantifican mediante la Ecuación 2.10, la cual permite estimar el factor de reducción del rendimiento del sistema en función del nivel de suciedad considerado. La inclusión de este parámetro en el modelo de cálculo resulta fundamental para representar de manera más realista las condiciones de operación del sistema fotovoltaico, ya que la suciedad constituye una de las principales fuentes de pérdidas en la generación de energía. Al considerar estas pérdidas, se mejora la precisión en la estimación de la potencia y la energía generada, contribuyendo a un dimensionamiento más confiable del sistema.

### 2.5.11. Determinación de la Energía Neta Útil

La energía útil neta corresponde a la cantidad de energía que queda disponible después de considerar todas las pérdidas del sistema, y se calcula a partir de la ecuación 2.11:

$$E_{net} = E_{bruta} \cdot n_{temp} \cdot n_{inv} \cdot n_{cab} \cdot n_{soi} \quad (2.11)$$

donde:

- Ebruta → Energía generada.
- Ntem → Eficiencia de temperatura.
- Ninv → Eficiencia del inversor.
- Ncab → Eficiencia del cable.
- Nsoi → Eficiencia del sistema.

Una forma práctica de simplificar todas las pérdidas es a través del Performance Ratio (Pr), como se observa en la ecuación 2.12:

$$PR = n_{temp} \cdot n_{inv} \cdot n_{cab} \cdot n_{soi} \quad (2.12)$$

Entonces:

$$E_{net} = E_{bruta} \cdot PR \quad (2.13)$$

donde:

- Enet → Energía neta.
- Ebruta → Energía total generada.
- PR → Performance Ratio.

La energía útil del sistema fotovoltaico se determina mediante la Ecuación 2.13, la cual considera la energía generada por el sistema y las diferentes pérdidas asociadas a su operación. A partir de la aplicación

de esta ecuación, se obtiene un valor de 2180 Wh/día, que representa la cantidad de energía efectivamente disponible para el abastecimiento de las cargas del sistema. Este parámetro resulta fundamental para el dimensionamiento adecuado de los componentes del sistema fotovoltaico, en particular del banco de baterías y del inversor, ya que permite verificar que la energía generada sea suficiente para cubrir la demanda energética diaria. Asimismo, el cálculo de la energía útil proporciona una estimación más realista del desempeño del sistema bajo condiciones de operación reales. Esto representa solo el dato de un día.

$$E_{\text{neto}} = 2725 \cdot 0,8 = 2180 \text{ Wh/día}$$

## 2.6. Modelo Estocástico

Con respecto al sistema fotovoltaico, se evidencia un modelo estocástico ya que permite analizar la variación natural en el clima y el uso de energía. Este procedimiento no aborda valores únicos y, a diferencia del método determinista, trata con valores que pueden cambiar con respecto a múltiples posibilidades. El objetivo es analizar la generación y el consumo bajo diferentes condiciones al incluir variables como la irradiancia y la incertidumbre de la demanda, así como el comportamiento probabilístico del inversor.

### 2.6.1. Aplicación del método Monte Carlo para Irradiancia y Demanda

El enfoque de Monte Carlo produce varios escenarios posibles de irradiancia y demanda según sus distribuciones probabilísticas, de las cuales tenemos:

a) **Ganancia Obtenida al Aplicar el Método de Monte Carlo:** La simulación de Monte Carlo se utiliza comúnmente para simuladores de sistemas alimentados por energía solar, lo que permite desarrollar simulaciones de rendimiento. La incertidumbre se simula en la irradiación solar, la temperatura, la eficiencia de los paneles solares y los precios de la electricidad utilizando simulaciones de probabilidad. Esto contribuye a calcular la probabilidad de alcanzar objetivos de producción de energía, ingresos o retorno de inversión (ROI) [46].

- **Análisis de riesgos:** Esto ayuda a identificar y cuantificar los riesgos relacionados con la instalación, como la variabilidad en la generación de energía o las fluctuaciones en los costos de

electricidad [46].

- Optimización de diseño: Ayuda a decidir el tamaño ideal de la instalación fotovoltaica en diversos contextos y en diferentes niveles de riesgo [46].
- Mejora de la toma de decisiones: Facilita la toma de decisiones informadas respecto a la inversión en sistemas fotovoltaicos al proporcionar una perspectiva clara de los posibles resultados y sus probabilidades [46].
- Estimación de la rentabilidad: Ayuda a determinar la rentabilidad esperada de la instalación y su posible retorno de inversión en diversos contextos [46].
- Análisis de la viabilidad económica: Ayuda a evaluar la viabilidad financiera del proyecto, teniendo en cuenta los gastos de instalación, mantenimiento y operación, así como los ingresos por la comercialización de energía [46].

**b) Ajuste de las Distribuciones:** Primero, se analizan las características reales de irradiancia y demanda (promedio, variación, forma del histograma) y se ajusta una distribución probabilística. La normal tiende a usarse en muchos casos ya que es sencilla de manejar y proporciona resultados aceptables cuando no hay valores extremadamente altos o bajos.

**c) Generación de Valores Aleatorios:** Una vez ajustada la distribución, el método puede generar miles de valores aleatorios que siguen esa distribución. Representan irradiancias o demandas potenciales que podrían ocurrir en la práctica.

**d) Creación de Escenarios:** Este proceso puede repetirse muchas veces (es decir, 1000 o 1500 iteraciones), y el resultado final de cada iteración es un año completo de datos horarios de irradiancia y demanda. Cada iteración es equivalente a un potencial “año futuro” con sus propias variaciones.

**e) Método de Monte Carlo aplicado a la demanda:** Se utiliza para anticipar la demanda futura de un producto o servicio, teniendo en cuenta la incertidumbre e imprevisibilidad inherentes al comportamiento del mercado [46]. Hay varios pasos utilizados en la simulación de Monte Carlo para la demanda. En primer lugar, se utiliza el análisis de datos históricos de demanda para descubrir patrones. Luego, caracterizamos las distribuciones de probabilidad para las condiciones primarias que influyen en la demanda, como la estacionalidad y las promociones.

Luego se genera un número aleatorio y se ejecutan diferentes escenarios de demanda para simularlos. Estos escenarios harán que el modelo se ejecute con diferentes resultados y se analizarán para determinar las probabilidades de varios resultados para tomar la decisión [46]. Primero se genera una tabla y se debe preparar un perfil de carga para los datos de variables características, y el más importante es el factor de carga. El factor de carga demuestra la evaluación del uso de la capacidad instalada [46].

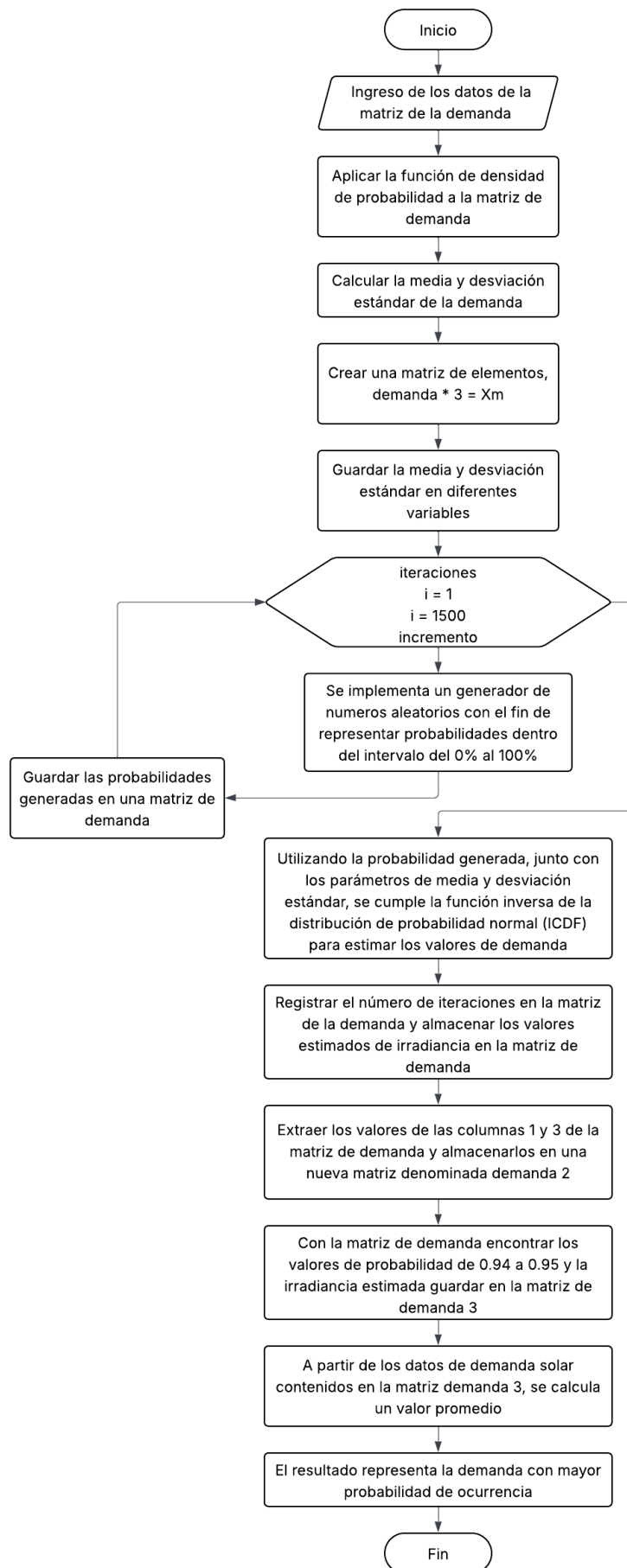


Figura 2.1: Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Demanda.

La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo del método de Monte Carlo aplicado a la demanda energética domiciliar considerada en este estudio. El proceso inicia con la identificación y caracterización de las cargas eléctricas del hogar, a partir de la cual se define el perfil de consumo diario. Posteriormente, la demanda energética es modelada mediante distribuciones estadísticas, que permiten representar la variabilidad en el uso de los equipos eléctricos a lo largo del tiempo.

A partir de estas distribuciones, se generan valores aleatorios de demanda para intervalos horarios específicos, simulando distintos escenarios de consumo domiciliario. Estos valores son utilizados para calcular la energía demandada diaria, proceso que se repite de manera iterativa durante un número elevado de simulaciones. Finalmente, los resultados obtenidos son sometidos a un análisis estadístico, permitiendo determinar valores representativos de la demanda energética, así como evaluar la probabilidad de ocurrencia de consumos máximos y mínimos. Este enfoque posibilita una estimación más realista de la demanda domiciliar, reduciendo la incertidumbre en el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

**f) Método de Monte Carlo Aplicando a la Irradiancia:** En el modelo de Monte Carlo para la irradiación solar, por ejemplo, la incertidumbre de la radiación solar y su impacto en los sistemas fotovoltaicos u otros sistemas que dependen de la luz solar se representan mediante métodos probabilísticos. A un nivel alto, estos resultados del sistema son simulaciones para cada uno de los varios escenarios de irradiación solar creados según distribuciones de probabilidad. Esto permite comparar la probabilidad e incertidumbre de resultados específicos con ella [47].

Los datos para el procedimiento se obtuvieron del sitio web de la NASA. El sitio te permite preferir el curso temporal de salida para los datos, por días o meses. El desafío clave es adaptar un modelo que tenga una resolución temporal y precisión diferentes. Aunque la técnica es la misma, cuando eliges el período de tiempo apropiado cambia la complejidad de tu modelo y cómo interpretas los resultados [47]. La simulación diaria genera fenómenos más complejos para reflejar fluctuaciones diarias, como el clima y el tráfico. Sin embargo, es computacionalmente compleja y costosa, pero proporciona mayor precisión al reconocer patrones y tendencias a corto plazo. Luego, la simulación mensual destaca tendencias y patrones a largo plazo al promediar el comportamiento de forma diaria. Es menos compleja y, por lo tanto, puede ejecutarse más rápidamente durante períodos de tiempo más

largos a expensas de la precisión en los detalles temporales. Usamos datos de probabilidad del 95 % para la irradiación, ya que los valores son menos extremos en ambas direcciones [47].

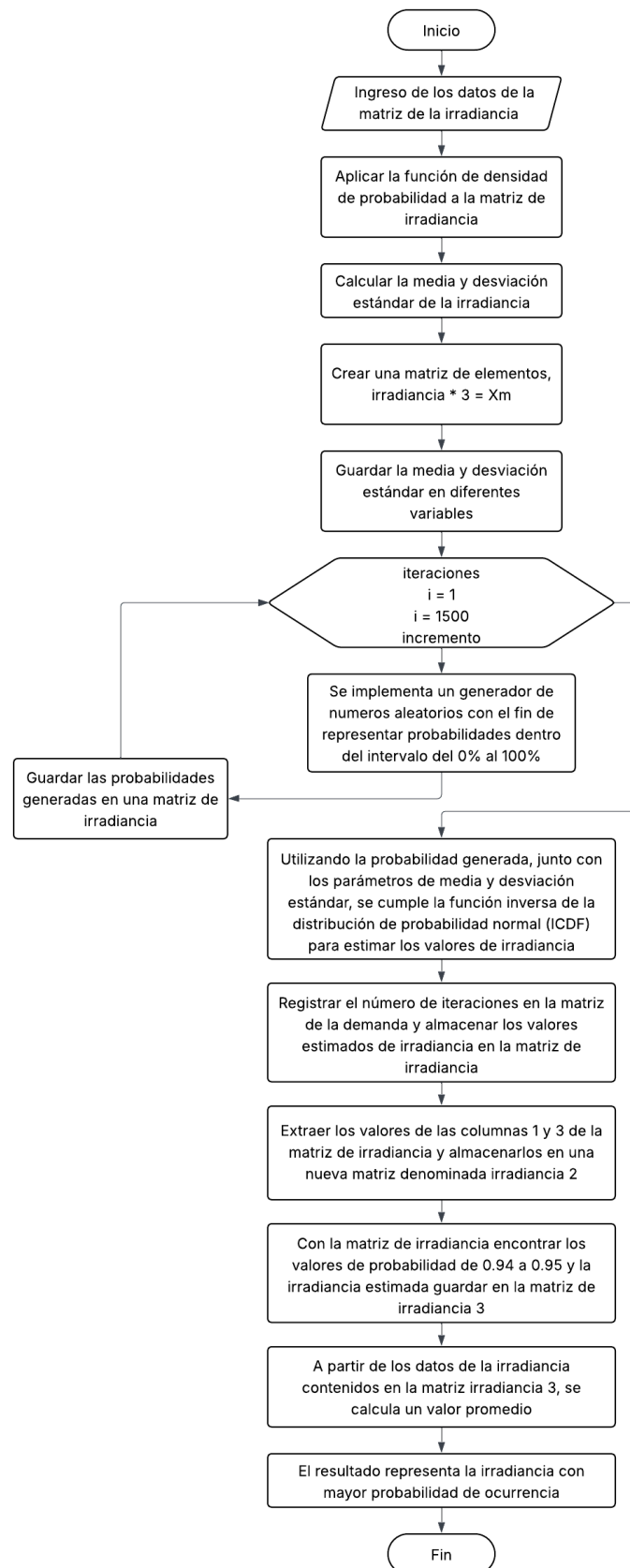


Figura 2.2: Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Irradiación Solar.

La Figura 2.2 presenta el diagrama de flujo del método de Monte Carlo aplicado al desarrollo del presente proyecto para el análisis y dimensionamiento del sistema fotovoltaico. El procedimiento inicia con la definición de las variables de entrada, entre las que se incluyen la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la demanda energética, las cuales son caracterizadas mediante distribuciones estadísticas obtenidas a partir de datos reales. Posteriormente, se generan valores aleatorios para cada una de estas variables, permitiendo simular múltiples escenarios posibles de operación del sistema.

A continuación, los valores generados son introducidos en el modelo matemático del sistema fotovoltaico, donde se calculan la potencia y la energía producida, considerando las pérdidas asociadas al rendimiento del sistema. Este proceso se repite de forma iterativa un número elevado de veces, lo que permite evaluar la variabilidad del sistema frente a las condiciones climáticas y de consumo. Finalmente, los resultados obtenidos son analizados estadísticamente, permitiendo estimar valores representativos como medias, desviaciones y probabilidades de cumplimiento de la demanda energética. Este enfoque posibilita una evaluación más robusta y realista del desempeño del sistema fotovoltaico, contribuyendo a un dimensionamiento óptimo y confiable.

**g) Método de Monte Carlo Aplicando a la Temperatura:** Para una simulación de Monte Carlo a temperatura ambiente, se calcula la probabilidad de una serie de resultados considerando la presencia de cambios ambientales.

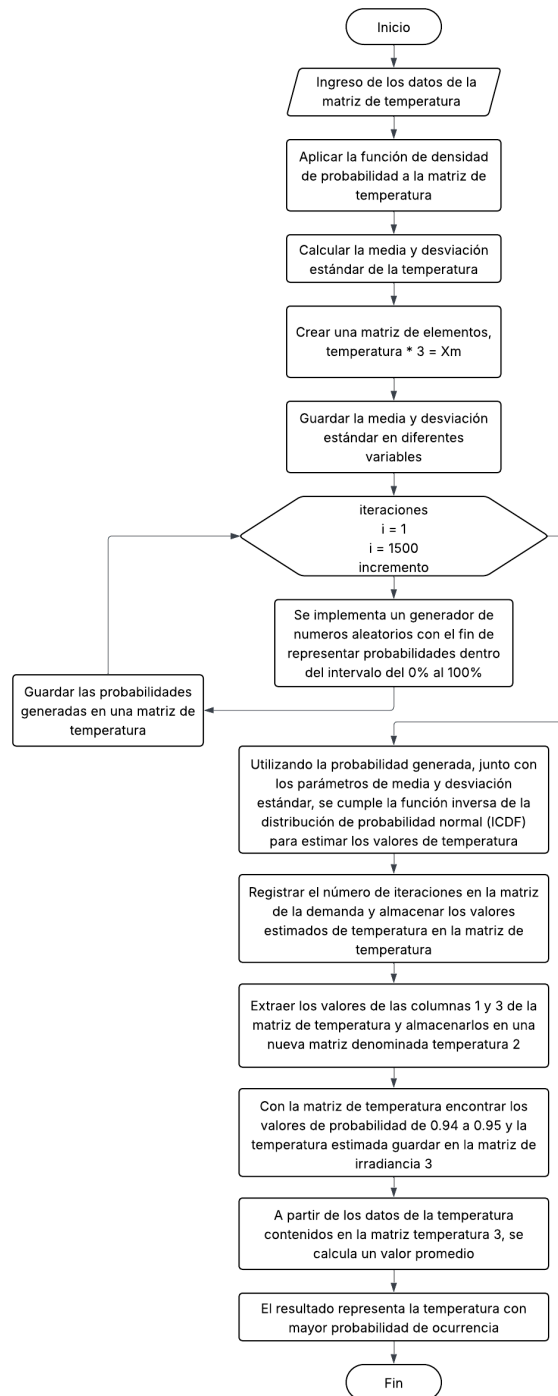


Figura 2.3: Diagrama de flujo del Método de Monte Carlo para la Temperatura.

La Figura 2.3 presenta el diagrama de flujo del método de Monte Carlo aplicado a la temperatura ambiente del lugar de estudio. El procedimiento inicia con la recolección y análisis de los datos históricos de temperatura, a partir de los cuales se identifican las características estadísticas que describen su com-

portamiento a lo largo del tiempo. Posteriormente, estos datos son utilizados para definir distribuciones probabilísticas, que permiten modelar la variabilidad térmica diaria y estacional del sitio.

A partir de las distribuciones definidas, se generan valores aleatorios de temperatura para intervalos horarios específicos, simulando múltiples escenarios térmicos posibles. Estos valores son incorporados en el modelo del sistema fotovoltaico para el cálculo de la temperatura de operación del panel, la cual influye directamente en el rendimiento y la potencia generada. El proceso se repite de forma iterativa durante un número elevado de simulaciones, y los resultados obtenidos son finalmente sometidos a un análisis estadístico, permitiendo estimar valores representativos y evaluar el impacto de la variabilidad térmica sobre el desempeño del sistema fotovoltaico. Este enfoque contribuye a una evaluación más realista del sistema bajo condiciones climáticas variables.

### 2.6.2. Simulación Horaria de la Generación y Demanda

Una vez que se obtienen los valores horarios de irradiancia y demanda para cada escenario, se simula el funcionamiento del sistema fotovoltaico hora por hora. El procedimiento es:

**Generación Fotovoltaica por hora:** La cantidad de energía generada por los paneles se determina a partir de la irradiancia cada hora. Esto se realiza aplicando la potencia nominal del sistema y ajustando por temperatura y pérdidas.

**Comparación de la Generación con la Demanda:** Se determina, por cada hora, si la energía generada es suficiente para satisfacer la demanda:

- Si la generación es mayor, hay excedentes de energía.
- Si la generación es menor, hay déficit.

Después de comparar la generación con la demanda por cada hora, se registra lo siguiente:

- Energía generada.
- Energía consumida.
- Energía faltante.
- Energía excedente.

Este procedimiento se repite a lo largo de todas las horas del año y en cada iteración del modelo Monte Carlo.

### **2.6.3. Modelado Inversor en Condiciones Probabilísticas**

En el modelo estocástico, también se considera que algunos componentes no siempre funcionan de la misma manera. El inversor transforma la energía de corriente continua a corriente alterna; este modelo considera:

- Su eficiencia (por ejemplo 95 % – 98 %).
- La posibilidad de fallos (aunque baja, puede incorporarse como probabilidad).

Esto permite replicar situaciones donde el inversor no funcione a su máxima capacidad o enfrente interrupciones temporales.

## **2.7. Dimensionamiento Final del Sistema Fotovoltaico**

Los aspectos del dimensionamiento de un sistema fotovoltaico incluyen la identificación de la potencia del generador, para asegurar la proporción de energía que se requiere con un nivel de confiabilidad aceptable. El análisis de diferentes configuraciones del equipo se relaciona con su rendimiento en términos de parámetros energéticos, técnicos y probabilísticos.

La determinación de la Potencia del generador fotovoltaico, en primera instancia se debe establecer cuanta potencia se requiere para el conjunto fotovoltaico (paneles solares). Al elegir la potencia ideal se consideran varios factores:

1. La demanda energética del usuario (puede ser diaria, mensual y anual).
2. El nivel de irradiancia disponible en el sitio.
3. El rendimiento real del sistema (pérdidas por temperatura, inversor, cables, suciedad).
4. Los resultados del modelo estocástico (probabilidad de déficit o excedentes).

Este enfoque implica analizar diferentes niveles de potencia fotovoltaica y comparar el patrón de generación anual, los períodos de déficit energético y la generación de energía excedente. De esta manera, se puede detectar un número que aborde la demanda energética con un margen razonable.

Después de establecer varias alternativas para la potencia fotovoltaica y la capacidad de almacenamiento, los resultados obtenidos se evalúan mediante simulaciones estocásticas.

Para la capacidad de almacenamiento de las baterías se realiza una simulación hora por hora de la generación y el consumo de energía a lo largo del año, teniendo en cuenta las variaciones tanto en la irradiancia como en la demanda.

Se calcula la cantidad de energía realmente entregada a la carga y cuánto se pierde debido a los excedentes.

Para esto se analiza los siguientes puntos:

- El estado de carga a lo largo del año.
- La frecuencia de ciclos de carga/descarga.
- La profundidad de descarga utilizada.
- La duración de los periodos sin suficiencia energética.

### **2.7.1. Selección del Sistema con Base en Criterios Técnicos y Energéticos**

Después de calcular todas las configuraciones, elegimos una configuración que ofrece el mejor rendimiento general. Para lograr una selección adecuada se utilizan los siguientes criterios para identificar la elección final apropiada:

#### **a) Criterios Técnicos**

- Compatibilidad entre energía fotovoltaica y la capacidad del inversor.
- Capacidad de la batería para periodos razonables de cargas y descargas.
- Eficiencia del sistema en su totalidad.
- Condiciones ambientales del sitio (temperatura, humedad, polvo).

## **b) Criterios Energéticos**

- Cobertura de la demanda en todo el año.
- Energía neta útil realmente entregada.
- Balance entre excedentes y déficit.
- Máximo aprovechamiento de la generación solar.

## **2.7.2. Protecciones Eléctricas de Corriente Continua y Corriente Alterna**

Al implementar un sistema fotovoltaico, los dispositivos de protección eléctrica necesarios para corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) son significativos para mantener el sistema seguro y funcionando eficientemente. Estas acciones de protección minimizan la posibilidad de sobrecorrientes, sobretensiones, cortocircuitos y fallos de aislamiento [35, 34].

### **2.7.2.1. Ecuaciones para el calculo de los equipos de protecciones**

Las protecciones eléctricas, por ejemplo AC y DC, describen y calculan las corrientes de falla, los tiempos de respuesta y la elección de componentes para hacer que el sistema sea confiable para suministrar energía [35, 33, 34].

#### **a) Corriente Alterna**

Los interruptores termomagnéticos y fusibles, son dispositivos de protección en corriente alterna, diseñados para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos. Los componentes como los fusibles de fusión que cortan el circuito eléctrico, los interruptores diferenciales para detectar fugas a tierra y prevenir posibles electrocuciones. También existen dispositivos para la protección contra picos de voltaje. Todos estos dispositivos son cruciales para la seguridad y protección de las instalaciones eléctricas, los electrodomésticos y las personas en entornos industriales, comerciales y residenciales.

#### **- Calculo de corriente de cortocircuito:**

La corriente de cortocircuito es clave para la protección de los sistemas AC y se calcula en base a la ecuación 2.14 particular.

$$I_{cc} = \frac{V}{Z} \quad (2.14)$$

donde V es el voltaje y Z la impedancia, la impedancia Z es compleja y se halla con la ecuación 2.15:

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2} \quad (2.15)$$

#### - **Curvas de Ruptura:**

Los dispositivos de protección, por ejemplo, fusibles y relés, contienen curvas que muestran la relación de la corriente con el tiempo hasta que un dispositivo se activa. El correcto funcionamiento de estas curvas es importante para la coordinación de varios mecanismos de protección [35, 36, 33, 34].

#### b) **Corriente continua**

Los dispositivos de protección de corriente continua (CC) son fundamentales para resguardar equipos delicados contra sobretensiones y sobrecorrientes. Entre estos dispositivos se encuentran los fusibles CC, que se funden para interrumpir el circuito, y los interruptores magnetotérmicos DC, que son rearmables y protegen contra sobrecargas y cortocircuitos. También se utilizan limitadores de sobretensión (SPD de CC), que emplean tecnologías como varistores (MOV) para desviar picos de voltaje, así como seccionadores DC que permiten un aislamiento manual. Estos componentes son esenciales en sistemas fotovoltaicos y automotrices, aplicándose en paneles solares, vehículos eléctricos y electrónica de precisión [35, 36, 33, 34].

- **Calculo de corriente de cortocircuito** Se calcula  $I_{cc}$  con la ecuación 2.16:

$$I_{cc} = \frac{V}{R} \quad (2.16)$$

donde V es el voltaje y R es la resistencia.

## 2.8. Simulación de Monte Carlo

Un modelo probabilístico que es capaz de tener en cuenta la incertidumbre o aleatoriedad en la predicción de eventos. Debido a que el resultado se simula con un modelo probabilístico, se obtienen variaciones cada vez que se realiza una simulación. En la estimación de irradiancia y carga, permite modelar la variabilidad de la irradiancia solar y la demanda de carga, lo que lleva a múltiples escenarios para realizar un análisis del sistema y se toman decisiones para el diseño y operación del sistema. La simulación de Monte Carlo implica tres pasos principales:

- 1. Generación de entradas aleatorias:** Se generan varios grupos de datos de entrada, cada uno con valores aleatorios dentro de un rango establecido para las variables que se investigan en el modelo.
- 2. Ejecución de la simulación:** El modelo se implementa con cada grupo de datos de entrada, produciendo una serie de resultados potenciales.
- 3. Análisis de resultados:** Los resultados recopilados se analizan para estimar la probabilidad de diferentes escenarios y sus posibles implicaciones.

### 2.8.1. Simulación de Monte Carlo en el Sistema Fotovoltaico

Las técnicas del procedimiento de Monte Carlo se aplican ampliamente para predecir el rendimiento del sistema en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos en múltiples escenarios. Se pueden utilizar para modelar la incertidumbre de la irradiancia solar con el fin de maximizar la eficiencia operativa del panel solar [48, 49].

#### 2.8.1.1. Aplicaciones en Sistemas Fotovoltaicos

- a) Simulación del Proceso de Generación de Energía:** El método de Monte Carlo se utiliza para simular una serie de diferentes escenarios de generación a lo largo del ciclo de generación de energía y para cubrir la variabilidad de la irradiancia solar entre otros parámetros. Principalmente, ayuda a estimar la potencia esperada y determinar la fiabilidad del sistema [48, 49].
- b) Análisis de la Eficiencia del Sistema:** En cuanto al análisis de eficiencia, se puede simular y com-

parar el rendimiento (o variaciones) de paneles solares, inversores, etc. (incluyendo otras instalaciones de energía) para investigar los efectos y factores de riesgo que potencialmente causan fallos en el sistema [48, 49].

c) **Evaluación de Efectos de Sombra:** En el análisis de sombras, es posible derivar sus impactos diarios y el impacto estacional de la Irradiancia solar. Esto permite optimizar el diseño del panel solar y monitorear las pérdidas de energía debido a las sombras para un control continuo [48, 49].

e) **Análisis de Riesgos y Fiabilidad:** Este es el proceso en el que se estima la probabilidad de que un sistema no cumpla su función o no alcance los niveles necesarios de energía sobre la base de la evaluación del rendimiento y la fiabilidad del sistema [48, 49].

- **La Carga:** Este proceso se define en 2 fases, inicialmente se realizará en la residencia establecida de uno de los participantes del estudio. Seguidamente implicaría una comparación entre una simulación de Monte Carlo y un sistema fotovoltaico en funcionamiento. El sistema seleccionado es el que está instalado en la Universidad Politécnica Salesiana, y el resultado final debe ser una producción de energía que coincida con la generación real de energía.

- **Radiación Solar:** Las estadísticas de irradiancia solar se obtendrán del sitio web oficial de la NASA y se procesarán mediante el método de Monte Carlo. Estos detalles permitirán definir los tamaños de los paneles solares a utilizar.

#### 2.8.1.2. Análisis de Fiabilidad de Sistemas Fotovoltaicos Mediante el Método de Monte Carlo

Monte Carlo se utiliza para realizar un análisis de la fiabilidad del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos (PV) en diversas condiciones de operación y situaciones adversas. Esto hace posible optimizar el diseño del sistema, determinar la producción de energía estimada y evaluar el riesgo de variación climática, fallo de componentes o cambio de demanda [46].

a) **Análisis de Rendimiento:** Esto está dirigido a evaluar la capacidad de un sistema fotovoltaico para la generación de energía a lo largo del tiempo, dependiendo de la irradiancia solar, la temperatura

y las condiciones ambientales. Para medirlo, se puede ver si este sistema puede producir energía y diagnosticar cualquier defecto que ocurra [46].

**b) Optimización de Diseño:** Permite evaluar varios sistemas, como la orientación e inclinación de los paneles solares, inversores y cableado. Esto hace posible seleccionar la alternativa mejor gestionada para aumentar la tasa de generación de electricidad entre las opciones más efectivas sin gastar demasiado dinero [46].

**c) Análisis de Confiabilidad:** Esto incluye la simulación de fallos del sistema en caso de puntos potencialmente fallidos dentro del sistema, por ejemplo, posiblemente en paneles solares o celdas de inversores, para calcular la probabilidad de un fallo y encontrar el MTBF (tiempo medio de reparación) y MTTR (tiempo medio entre fallos). Tal información es valiosa para planificar las medidas de mantenimiento preventivo [46].

**d) Evaluación de Riesgos:** Este estudio puede analizar eventos adversos potenciales para producir energía y determinar la rentabilidad del sistema. Estos incluyen el deterioro natural de los paneles solares, fluctuaciones en el precio o variaciones en el uso de energía [46].

**e) Escenarios de Incertidumbre:** Los modelos de escenarios proporcionan una comprensión más clara de las incertidumbres asociadas con los principales parámetros de radiación solar, consumo de energía y cambios en las tarifas eléctricas; estos proporcionan una visión más realista del rendimiento de la planta de energía fotovoltaica bajo diferentes escenarios [46].

### 2.8.1.3. Irradiancia Diaria vs Irradiancia mensual

La distinción más importante entre el análisis de irradiancia diaria y mensual se refiere al período de tiempo para la recopilación de datos y los procedimientos analíticos. El análisis diario se ocupa de la irradiancia solar entregada en un día específico, mientras que el análisis mensual se ocupa del promedio de la luz solar recibida durante todo un mes [47].

#### - Análisis de Irradiancia Diaria

- Se enfoca en la irradiancia solar recibida en un día específico [47].

- Puede detectar una variación individual de la irradiancia a lo largo del día, por ejemplo, la máxima irradiancia solar que se puede recibir al mediodía [47].
- Es útil para la planificación de actividades al aire libre, la optimización del funcionamiento de sistemas solares (por ejemplo, paneles solares) y la predicción de las condiciones meteorológicas [47].

#### - Análisis de Irradiancia Mensual

- Considera la irradiancia solar promedio recibida durante un mes [47].
- Permite identificar tendencias a largo plazo, como la variación de la irradiancia solar a lo largo del año [47].
- Es útil para la planificación de la construcción de edificios, el diseño de sistemas solares para aplicaciones a largo plazo y el estudio del clima regional [47].

### 2.8.2. Análisis del Déficit y Exceso de Energía

Dado que es un sistema conectado a la red eléctrica, se debe conocer su producción de energía excedente que puede conectarse a la red y, en caso de que falte, también se debe encontrar la cantidad faltante. La producción de energía excedente ocurre cuando una instalación de energía, incluidas las placas solares, produce más electricidad de la que se consume en ese momento. Esta electricidad excedente se alimenta a la red eléctrica. Para el autoconsumo, la energía renovable se produce en hogares o negocios, y en ocasiones se genera más electricidad de la que se requiere. Este excedente se envía a la red eléctrica pública para que otros la consuman. Además, los usuarios que contribuyen con energía a la red a menudo reciben compensación económica, generalmente en forma de un descuento en su factura de electricidad. La producción faltante se refiere a la diferencia entre la demanda de energía eléctrica y la producción que se está generando. La demanda representa la cantidad de energía que los consumidores, tanto en hogares como en entornos industriales, consumen en un momento dado. La producción es la energía generada por las unidades generadoras en ese instante. Cuando la demanda es mayor que la producción, hay un déficit de energía, por lo tanto, pueden causar apagones o necesidad de importar energía.

# Capítulo 3

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1. Presentación de resultados

En este capítulo se presentan los resultados del diseño de un sistema fotovoltaico implementado en un hogar. Asimismo, se realiza una comparación con un sistema fotovoltaico previamente instalado en la Universidad Politécnica Salesiana. Este análisis comparativo permite evaluar el rendimiento del sistema propuesto frente a una instalación real, lo que respalda los resultados obtenidos a través del proceso de dimensionamiento.

Los datos utilizados para dimensionar del sistema fotovoltaico incluyen, por un lado, a la demanda energética de la vivienda, determinada a partir de la planilla de consumo eléctrico proporcionada por la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR. Por otro lado, se consideraron los datos de irradiación solar necesarios para el análisis del recurso energético. En ambos casos, la información fue obtenida de bases de datos oficiales disponibles en la plataforma de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA).

En el caso del sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Politécnica Salesiana, se espera que los valores de generación energética presenten un comportamiento similar a los resultados obtenidos mediante el método de simulación Monte Carlo. Esta similitud permite validar la aplicación del enfoque estocástico, demostrando su eficacia para representar tanto la variabilidad del recurso solar y el desempeño real de los sistemas fotovoltaicos.

## 3.2. Análisis del Perfil de Carga

Los datos obtenidos abarcan el año 2024, lo que facilitó una visión global del comportamiento de la demanda eléctrica durante este período. Con esta información, se creó la Tabla 1.1, que detalla los equipos eléctricos presentes en la vivienda, la potencia necesaria para su operación, las horas estimadas de uso y el consumo total de energía relacionado con la vivienda objeto de estudio, sobre la cual se realizó el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

A partir de los datos incluidos en esta tabla, se desarrolló un perfil de carga que permite analizar integralmente el comportamiento de la demanda en función del tiempo. Para la elaboración del perfil de carga, se consideraron las horas de funcionamiento de los equipos eléctricos, obteniendo como resultado la representación gráfica mostrada en la Figura 3.1.

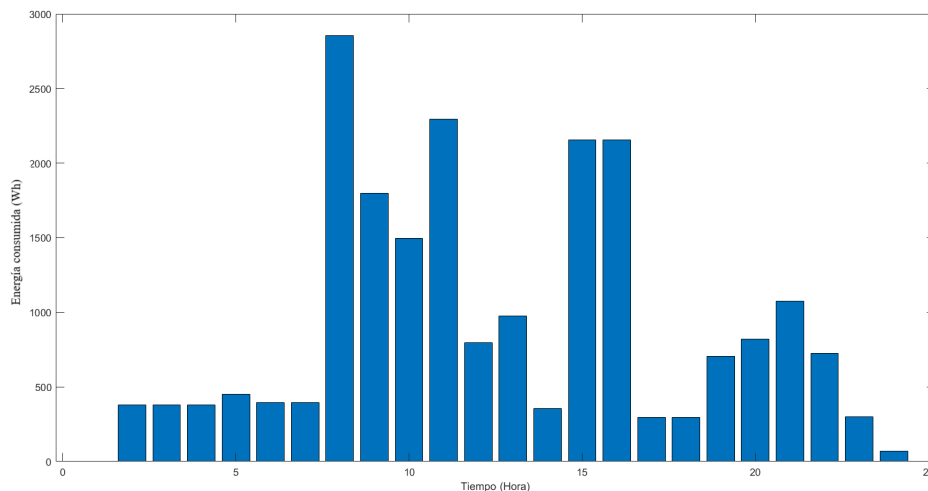


Figura 3.1: Perfil de carga de un solo día.

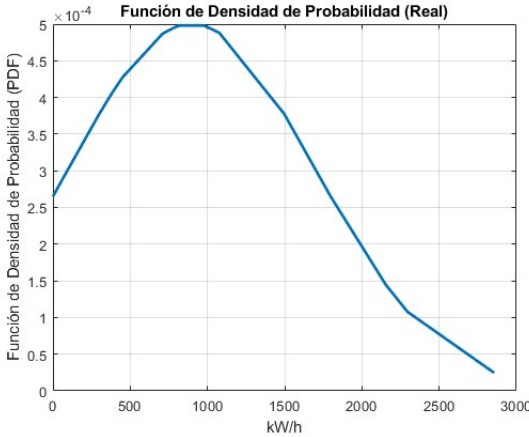
La Figura 3.1 ilustra el perfil de carga a lo largo del día. Para llevar a cabo un análisis anual, este procedimiento se repite 365 veces utilizando un bucle for, y los resultados finales se almacenan en una base de datos en formato CSV.

### 3.2.1. Análisis de la Simulación de Monte Carlo para Demanda

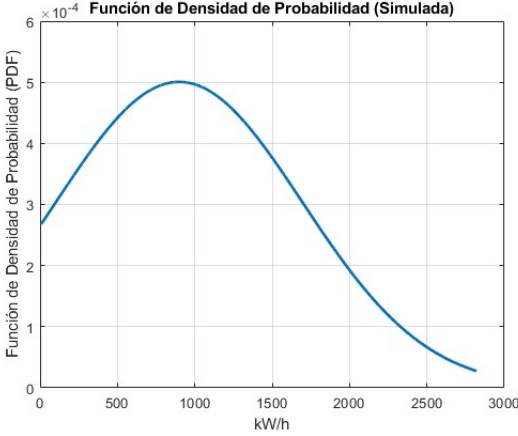
Utilizando un conjunto de datos que representa la demanda energética anual, se emplea el método de simulación Monte Carlo diariamente durante un período de 365 días. Para modelar la distribución

probabilística de la demanda diaria en relación con su promedio, se utiliza una función de densidad normal. En cada iteración del día, se calculan tanto la media como la desviación estándar; estos parámetros son luego promediados para establecer valores constantes que faciliten las estimaciones.

La obtención de los valores correspondientes a irradiación solar se realiza mediante el uso inverso de esta distribución probabilística, lo cual permite determinar el valor relacionado con una media y desviación estándar previamente definidas.



(a) Función de Densidad de Probabilidad (Real).



(b) Función de Densidad de Probabilidad (Simulada).

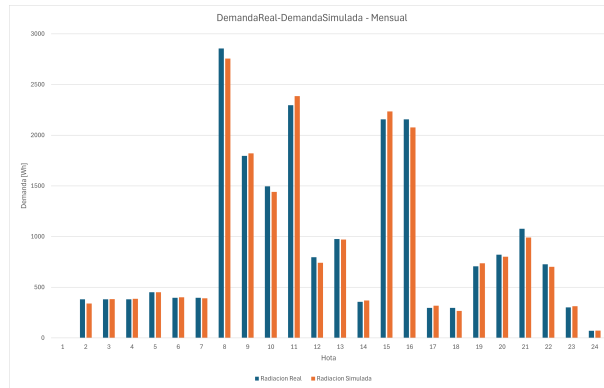
Figura 3.2: Función de Densidad de Probabilidad de Demanda.

La Figura 3.2 presenta el resultado de la simulación de Monte Carlo aplicada a la demanda energética domiciliar para un solo día. Como se observa en las Figuras 3.2(a) y 3.2(b), la diferencia entre ambas distribuciones radica principalmente en la cantidad de datos empleados para su construcción, ya que la demanda simulada se obtiene a partir de 1500 iteraciones, conforme a lo establecido en los diagramas

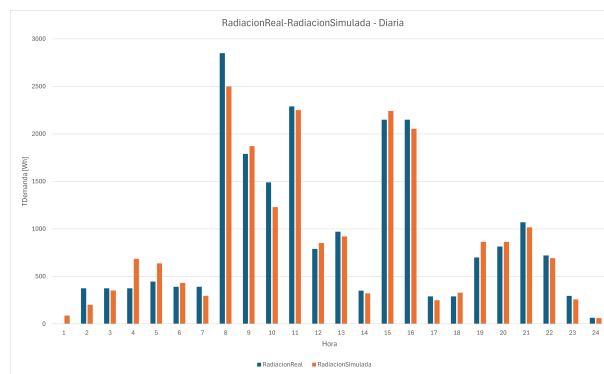
de flujo del método. En este sentido, cada simulación genera un valor de demanda, dando lugar a un conjunto de 1500 datos que permiten caracterizar estadísticamente su comportamiento. En las gráficas, el eje de las abscisas representa el valor de la demanda eléctrica, identificándose un valor mínimo de 0 W y un valor máximo cercano a 3000 W.

Para el ajuste de la distribución de probabilidad asociada a estos datos se emplea el comando `fitdist`, el cual permite modelar estadísticamente la demanda energética a partir de los valores obtenidos en la simulación. Este comando estima los parámetros de la distribución seleccionada utilizando el criterio de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Estimation, MLE), que consiste en determinar los parámetros que maximizan la probabilidad de que los datos observados hayan sido generados por dicha distribución. De esta manera, el ajuste obtenido representa adecuadamente la tendencia y la variabilidad de la demanda simulada, permitiendo utilizar la distribución resultante para la generación de valores aleatorios en posteriores simulaciones de Monte Carlo y reproducir de forma realista el comportamiento estadístico de la demanda energética.

En el siguiente punto, se tienen los datos de demanda diaria reales y demanda simulada; se procede a graficar para identificar si los datos son semejantes. La figura 3.3 es el resultado de la simulación de Monte Carlo para la demanda. La figura 3.3(a) es la simulación mensual. La figura 3.3(b) es la simulación diaria, y, por último, la gráfica de color azul es la radiación real y la naranja es el resultado de la simulación de Monte Carlo.



(a) Demanda Real vs Demanda Simulada (Mensual).



(b) Demanda Real vs Demanda Simulada (Diaria).

Figura 3.3: Demanda Real vs Demanda Simulada

Finalmente, la figura 3.4 muestra el número de consumo energético repetidas de todo un año. Como se observa, los valores cercanos a 500 son los más frecuentes.

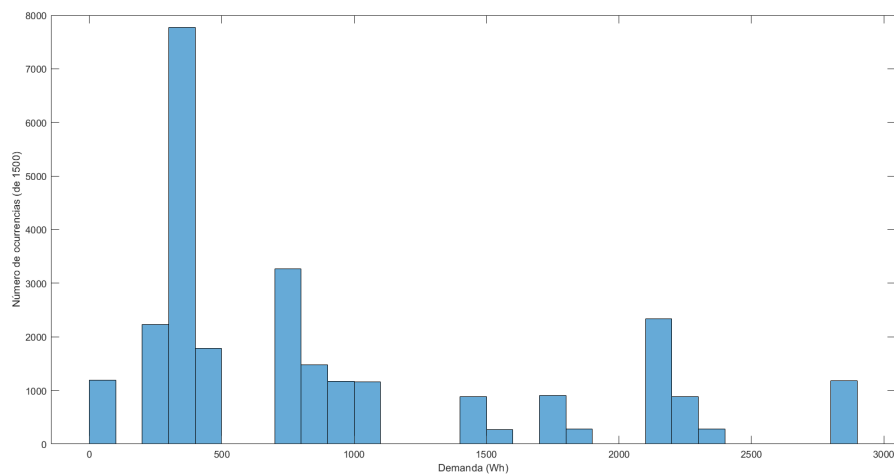
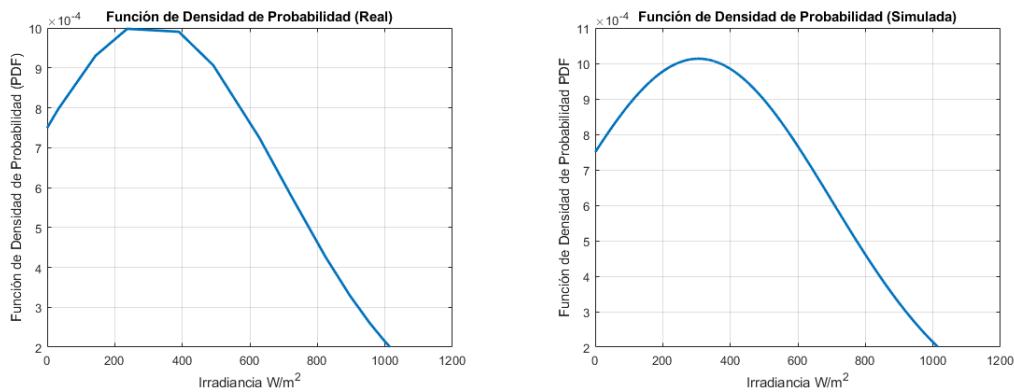


Figura 3.4: Número de ocurrencia de la demanda

### 3.2.2. Análisis de la Simulación de Monte Carlo para la Irradiancia Solar

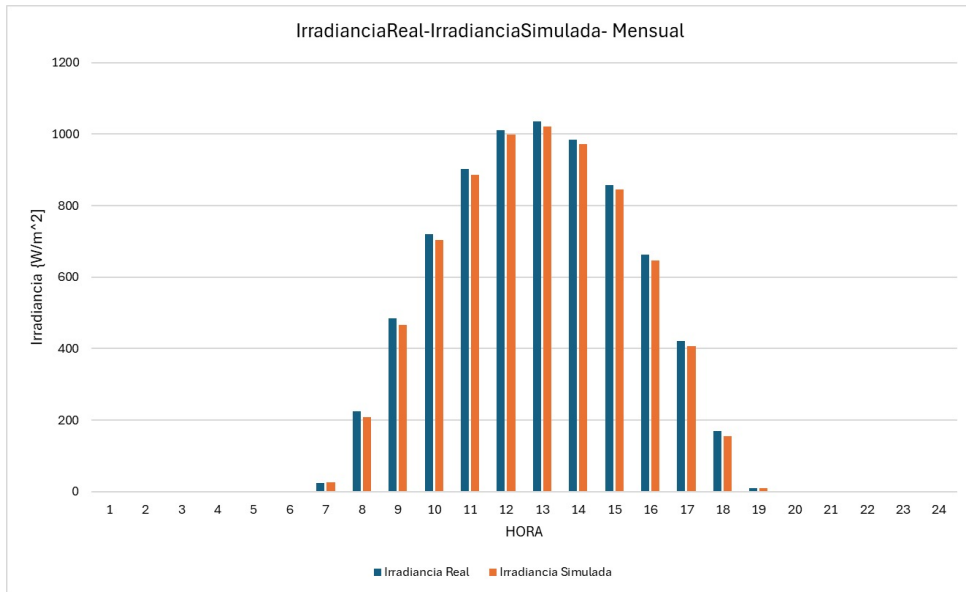
Para la irradiancia solar, la base de datos es obtenida mediante la página de la NASA; aplicando lo mismo en el punto del análisis de simulación de Monte Carlo para la demanda, el resultado para la media es 313.9525 w/h y una desviación estándar de 403.7776 w/h. La figura 3.5 es el resultado de la simulación de Monte Carlo para un solo día. El valor de la abscisa representa el valor de la irradiancia solar, se observa el valor mínimo que se puede obtener, que es 0, y el valor máximo es 1000 W/m<sup>2</sup>



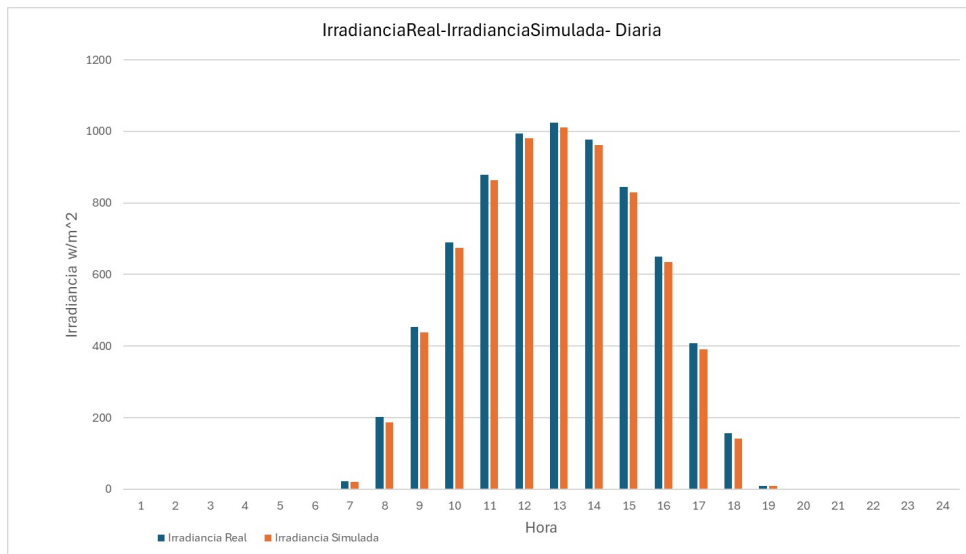
(a) Función de Densidad de Probabilidad (Real). (b) Función de Densidad de Probabilidad (Simulada).

Figura 3.5: Función de Densidad de Probabilidad de Irradiancia Solar.

En el siguiente punto, se tienen los datos de irradiancia solar diaria real (figura 3.5(a)) e irradiancia solar diaria simulada (figura 3.5(b)), se procede a graficar para identificar si los datos son semejantes. La figura 3.6 es el resultado de la simulación de Monte Carlo para la demanda. La gráfica de color azul es la irradiancia real y la naranja es el resultado de la simulación de Monte Carlo.



(a) Irradiancia Solar Real vs Irradiancia Solar Simulada (Mensual).



(b) Irradiancia Solar Real vs Irradiancia Solar Simulada (Diaria).

Figura 3.6: Irradiación Solar Real vs Irradiación Solar Simulada.

Finalmente, se busca identificar la cantidad de veces que puede ocurrir un evento, como se observa en la gráfica 3.7. permite determinar qué niveles de radiación se presentarán con mayor frecuencia.

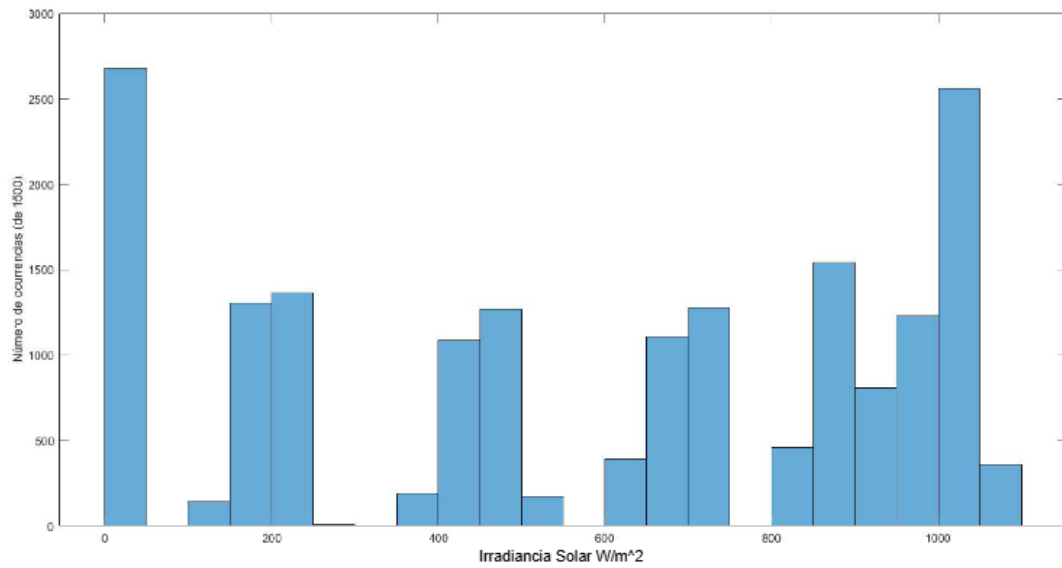
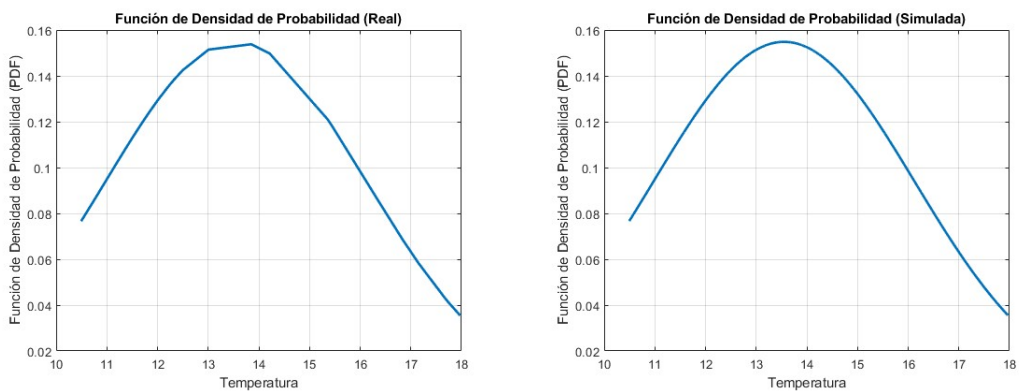


Figura 3.7: Número de Ocurrencia.

### 3.2.3. Análisis de la Simulación de Monte Carlo para la Temperatura

Para la temperatura, la base de datos es obtenida mediante la página de la NASA; aplicando lo mismo en el punto del análisis simulación de Monte Carlo para la demanda, el resultado para la media es 14.1238 y una desviación estándar de 2.4517. La figura 3.8 es el resultado de la simulación de Monte Carlo para un solo día. El valor de la abscisa representa el valor de la irradiancia solar; se observa el valor mínimo que se puede obtener, que es 0, y el valor máximo es 18 centígrado.

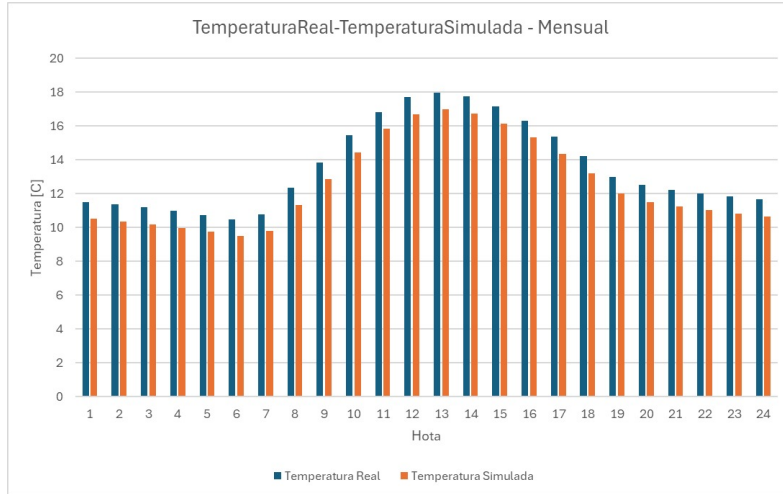


(a) Función de Densidad de Probabilidad (Real). (b) Función de Densidad de Probabilidad (Simulada).

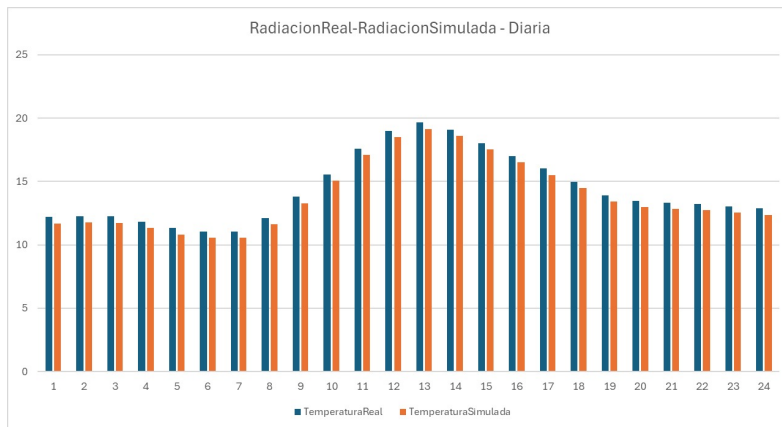
Figura 3.8: Función de Densidad de Probabilidad de Temperatura.

En el siguiente punto, se tienen los datos de temperatura diaria real e temperatura simulada; se procede

a graficar para identificar si los datos son semejantes. La figura 3.9 es el resultado de la simulación de Monte Carlo para la temperatura. La gráfica de color azul es la temperatura real y la naranja es el resultado de la simulación de Monte Carlo.



(a) Temperatura Real vs Temperatura Simulada (Mensual).



(b) Temperatura Real vs Temperatura Simulada (Diaria).

Figura 3.9: Función de Densidad de Probabilidad de Temperatura.

Finalmente, se busca identificar la cantidad de veces que puede ocurrir un evento, como se observa en la gráfica 3.10. Nos ayuda a determinar qué niveles de radiación se presentarán con mayor frecuencia.

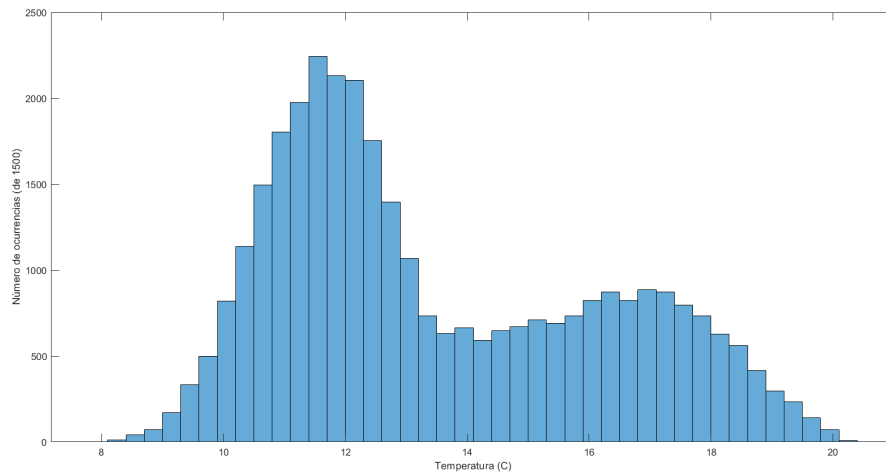


Figura 3.10: Numero de ocurrencia de la temperatura

### 3.2.4. Análisis estadísticos de la radiación y la demanda.

El análisis estadístico de la radiación solar y de la demanda energética constituye un elemento fundamental para comprender el comportamiento del recurso solar y del consumo eléctrico en la vivienda representativa. En primer lugar, se realizó una caracterización descriptiva de la irradiancia solar mediante el estudio de sus parámetros básicos, tales como la media, mediana, desviación estándar, varianza, máximos y mínimos registrados durante el período de medición. Este análisis permitió identificar patrones relevantes como la presencia de picos de irradiancia alrededor del mediodía y la reducción significativa durante las mañanas nubladas o días con elevada cobertura de nubes, elementos característicos del régimen climático de la ciudad de Cuenca. Adicionalmente, se analizaron las variaciones horarias y diarias, lo que permitió determinar la estabilidad del recurso solar y su aporte energético potencial.

De manera complementaria, se llevó a cabo un estudio detallado de la demanda energética de la vivienda, considerando su perfil de carga horario, los consumos pico y la distribución del consumo durante el día. Se evaluaron parámetros estadísticos tales como la demanda promedio diaria, la dispersión del consumo en horas de mayor actividad y las diferencias estacionales, que permiten comprender las necesidades reales de energía del usuario. La comparación entre los datos reales y los patrones estadísticos estimados evidenció coherencia entre la variabilidad de la carga y la radiación solar disponible, lo cual justifica el uso de métodos estocásticos para una representación más precisa del comportamiento energético.

### **3.2.5. Comportamiento energético del sistema en diferentes escenarios.**

Con base en las distribuciones obtenidas, se implementó el método de Monte Carlo para la generación de múltiples escenarios aleatorios que permiten evaluar el desempeño del sistema fotovoltaico bajo condiciones diversas de radiación solar, temperatura y demanda energética. Cada escenario consiste en un conjunto de valores aleatorios generados de acuerdo con las distribuciones ajustadas, lo cual posibilita la reproducción de situaciones tanto normales como extremas que podrían ocurrir en condiciones reales de operación.

Para cada simulación se calculó la energía producida por el sistema fotovoltaico, considerando factores tales como la potencia nominal del panel, el coeficiente de temperatura, la irradiancia incidente y las pérdidas sistémicas. Este proceso permitió determinar la cantidad de energía disponible en cada escenario y compararla con la demanda simulada. A partir de esta comparación se evaluaron indicadores como la energía faltante (cuando la demanda supera a la generación) y la energía excedente (cuando la generación es mayor que la demanda). Estos resultados proporcionan una visión detallada del desempeño del sistema en distintas condiciones, permitiendo estimar su confiabilidad y su capacidad para cubrir las necesidades energéticas del usuario.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante la simulación fueron comparados con la generación real de un sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Politécnica Salesiana. La comparación evidenció un error del 3.75 % entre la generación simulada y la generación medida, lo cual valida la precisión de la metodología propuesta. Este análisis demuestra que el enfoque estocástico empleado permite dimensionar el sistema fotovoltaico de manera más eficiente y realista, evitando el sobredimensionamiento y garantizando un desempeño adecuado bajo condiciones variables.

### **3.2.6. Energía Ahorrada y Exceso**

El análisis del histograma de energía ahorrada revela que, si bien existe una alta frecuencia de registros cercanos a 0 kWh atribuidos a periodos de baja generación o demanda mínima, el sistema fotovoltaico demuestra una notable eficacia operativa al concentrar gran parte de sus ocurrencias en el rango de 500 a 1200 kWh. Esta distribución confirma una contribución constante y significativa al suministro eléctrico, aunque con una presencia reducida de escenarios de ahorro superior a los 1500 kWh, los cuales quedan

supeditados a condiciones excepcionales de irradiancia. En conjunto, los datos validan la capacidad del sistema para reducir la dependencia de fuentes convencionales de manera sostenida.

La distribución de la energía en exceso evidencia un dimensionamiento adecuado del sistema, destacando una alta frecuencia de registros cercanos a 0 Wh, lo que indica que la generación suele alinearse con la demanda sin producir excedentes masivos. No obstante, se identifica un pico de ocurrencias relevante en torno a los 500 Wh, estableciéndose como el valor de sobreproducción más recurrente, mientras que los excedentes superiores a 2000 Wh resultan excepcionales. Esta tendencia confirma que el sistema minimiza la energía no aprovechada, manteniendo la mayor parte de la producción sobrante en niveles bajos y controlados.

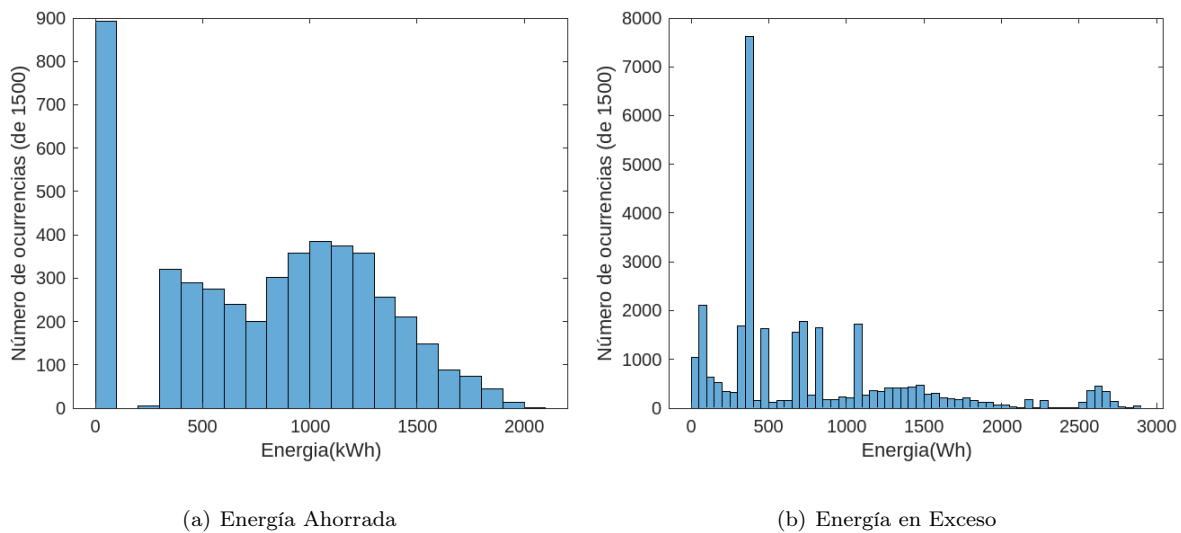


Figura 3.11: Energía Ahorrada y Energía en Exceso.

### 3.3. Análisis del Dimensionamiento Estocástico

#### 3.3.1. Potencia Fotovoltaica.

El dimensionamiento estocástico permitió determinar la potencia fotovoltaica para garantizar un suministro energético confiable bajo condiciones de variabilidad inherentes a la radiación solar y a la demanda eléctrica. A diferencia del enfoque determinista, que se basa únicamente en valores promedio o en escenarios puntuales, el dimensionamiento estocástico incorpora miles de simulaciones generadas a partir de distribuciones probabilísticas ajustadas, lo que permite representar con mayor precisión la incertidumbre

del recurso solar y el comportamiento del usuario. Como resultado, se identificó la potencia fotovoltaica mínima necesaria capaz de satisfacer la demanda en un alto porcentaje de escenarios, evitando el sobre dimensionamiento típico de los métodos tradicionales.

### 3.3.2. Generación del Sistema Fotovoltaico

Tabla 3.1: Resultado de la temperatura de la célula aplicando la fórmula  $T_C$ .

Hora	Irradiancia Solar Simulada ( $W/m^2$ )	Temperatura Simulada ( $^{\circ}C$ )	Temperatura de la Célula ( $^{\circ}C$ )
07:00	25.61125802	10.66577449	11.33807001
08:00	223.5043305	12.26246926	18.12945794
09:00	481.8254962	13.82109098	26.46901026
10:00	717.9751942	15.43837550	34.28522434
11:00	900.8581638	16.83902806	40.48655486
12:00	1013.109223	17.71131159	44.30542868
13:00	1036.497713	17.91685691	45.12492188
14:00	986.578325	17.70142168	43.59910271
15:00	859.4751621	17.22894680	39.79016980
16:00	662.5980900	16.33070019	33.72390005
17:00	422.9211646	15.41601039	26.51769096
18:00	169.4112871	14.27160243	18.71864872

La Tabla 3.1 presenta los resultados del cálculo de la temperatura de la célula fotovoltaica ( $T_c$ ), obtenidos mediante la aplicación de la ecuación correspondiente al modelo térmico del panel. Los valores mostrados corresponden a un día completo, considerando las 24 horas, y se calculan a partir de los datos horarios de temperatura ambiente e irradiancia solar registrados en el sitio de estudio. Esta tabla permite analizar la variación horaria de la temperatura de la célula a lo largo del día y evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. Cabe destacar que, aunque en esta sección se presentan los resultados de un solo día a modo ilustrativo, el mismo procedimiento de cálculo se aplica posteriormente al conjunto total de datos utilizados en el análisis anual del sistema fotovoltaico.

### 3.3.2.0.1 Cálculo de la potencia de los paneles a la temperatura de la celda

Una vez que se haya alcanzado la temperatura, se puede llevar a cabo el cálculo de la potencia que tendrá el panel operando a las temperaturas de la celda. A partir de los valores de temperatura de la célula obtenidos en la Tabla 3.1. En este cálculo se considera únicamente la influencia de la temperatura sobre el rendimiento del panel, sin tomar en cuenta la irradiancia solar, con el objetivo de analizar de forma aislada el efecto térmico en la potencia nominal del módulo. Por esta razón, los valores de potencia mostrados pueden presentar resultados distintos de cero incluso durante las horas en las que no existe radiación solar incidente. Los datos corresponden a un día completo de 24 horas y se presentan a modo ilustrativo, ya que este procedimiento forma parte de una etapa intermedia del modelo, el cual posteriormente incorpora la irradiancia solar para la estimación real de la energía generada por el sistema fotovoltaico por lo que el resultado se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Potencia generada de un panel por un día.

Hora	Potencia (W)
07:00	318,195293
08:00	431,519965
09:00	547,8821981
10:00	563,2176102
11:00	575,3846206
12:00	582,8772511
13:00	584,4850967
14:00	581,4914395
15:00	574,0183132
16:00	562,1162919
17:00	447,9777097
18:00	332,6759888

### 3.3.2.0.2 Generación de los paneles

A continuación, se analiza la generación diaria de los módulos fotovoltaicos y su comparación con la demanda de la carga, con el fin de identificar los períodos en los que la generación es suficiente, excedente

o insuficiente. En las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 se observa que existen intervalos horarios en los que la energía generada por los paneles abastece completamente la carga, otros en los que la supera y algunos en los que resulta insuficiente. En estos últimos casos, es necesario el apoyo de la red eléctrica para garantizar el suministro total de la demanda.

La Tabla 3.3 presenta de manera conjunta los valores de generación de energía de los paneles fotovoltaicos y el consumo energético de la sala, permitiendo analizar el balance energético del sistema. La generación de los paneles se obtiene a partir de los resultados presentados en la Tabla 3.2, incorporando en esta etapa la irradiancia solar, lo que permite estimar la potencia y la energía efectivamente producidas por los módulos fotovoltaicos. Por su parte, el consumo energético corresponde a la demanda eléctrica de la vivienda, determinada a partir del perfil de uso de los equipos considerados. La comparación de ambos valores permite evaluar si la energía generada por los paneles solares es suficiente para cubrir el consumo energético de la sala durante las diferentes horas del día, constituyendo un elemento fundamental para el análisis del desempeño y la viabilidad del sistema fotovoltaico propuesto.

Tabla 3.3: Comparación de generación de paneles con la demanda simulada

Hora	Generación de Paneles (Wh)	Consumo energético (Wh)
07:00	66,3581668	396,691007
08:00	593,985105	2857,00985
09:00	1319,91806	1797,08798
10:00	2021,88137	1497,06801
11:00	2591,69966	2297,00708
12:00	2952,59159	796,900081
13:00	3029,08733	976,993291
14:00	2868,43425	356,95231
15:00	2466,77241	2156,72161
16:00	1862,28591	2157,18329
17:00	1158,75686	296,906815
18:00	451,206624	297,000915

En las siguientes figuras 3.12, 3.13 y 3.14, se observa una gráfica de barras que compara la demanda contra la generación; la barra de color naranja representa la demanda y la barra de color azul representa la de generación. También se observa que en varias horas del día la generación supera a la demanda, por lo que va a existir inyección a la red eléctrica.

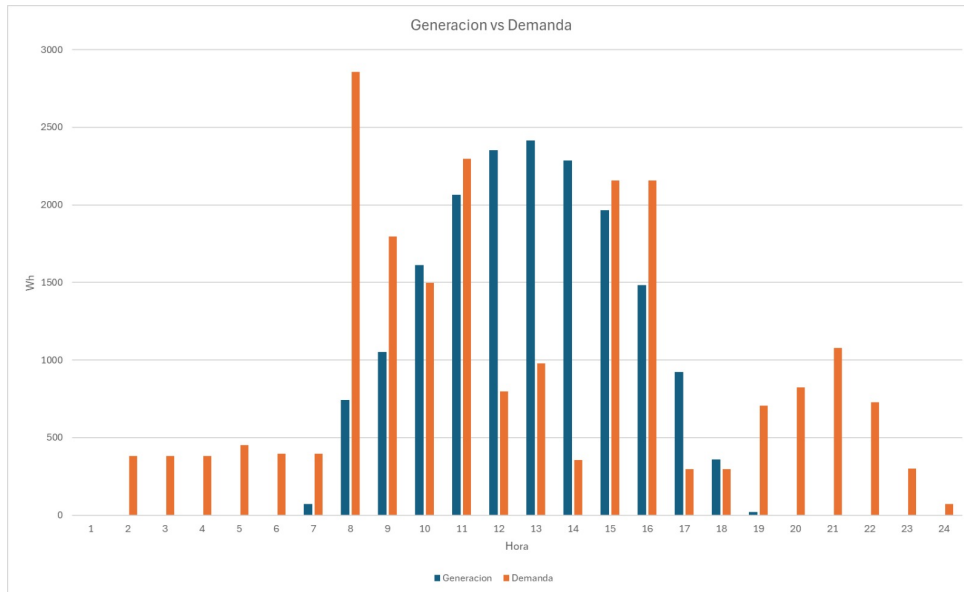


Figura 3.12: Demanda Simulada vs Producción de Energía con 4 paneles.

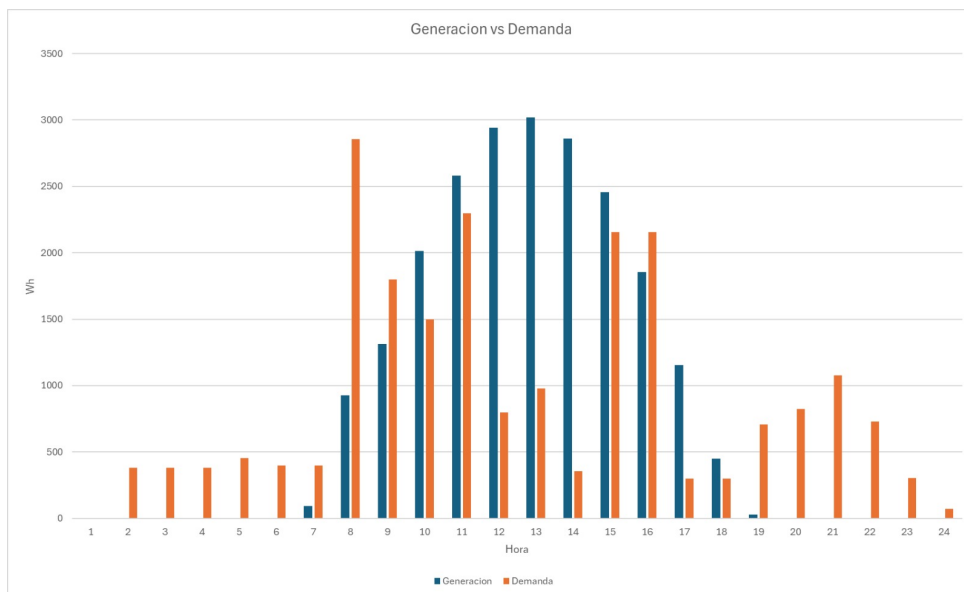


Figura 3.13: Demanda Simulada vs Producción de Energía con 5 paneles.

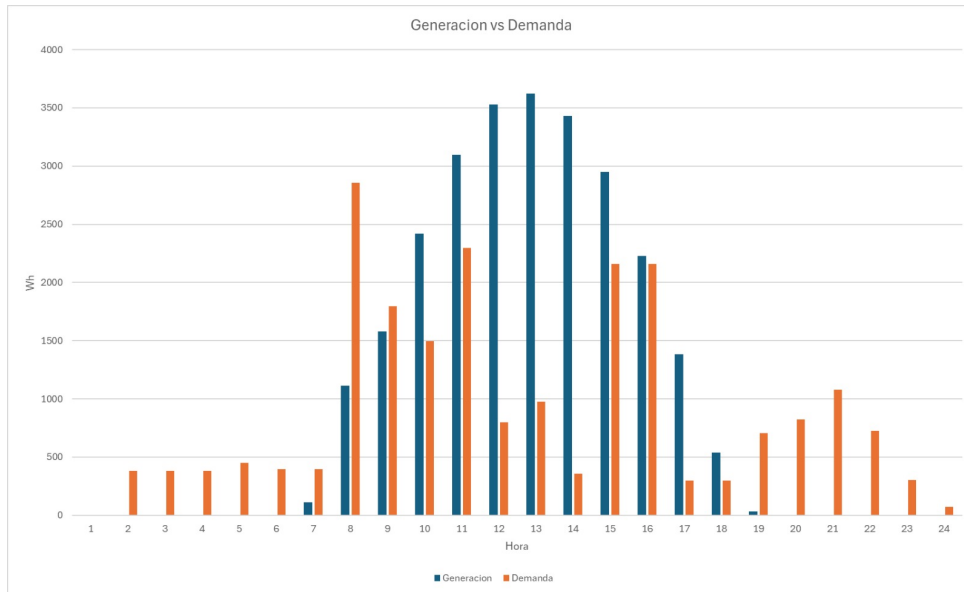


Figura 3.14: Demanda Simulada vs Producción de Energía con 6 paneles.

En las figuras presentadas se muestran las diferentes pruebas realizadas con el objetivo de analizar el comportamiento entre la energía generada por el sistema fotovoltaico y la demanda eléctrica. En la Figura 3.12 se presenta la prueba realizada con cuatro paneles solares, en la cual se observa que la energía generada resulta insuficiente para abastecer la demanda del sistema. Posteriormente, en la Figura 3.13 se muestra la prueba correspondiente a cinco paneles solares, configuración que, de acuerdo con el método de Monte Carlo, se determina como la más adecuada para el desarrollo del estudio. En esta figura se evidencia que la generación de energía logra satisfacer la demanda, obteniéndose resultados más confiables y un funcionamiento adecuado del sistema. Finalmente, en la Figura 3.14 se presenta la prueba realizada con seis paneles solares, donde se observa una condición de sobregeneración de energía, lo que indica un sobredimensionamiento del sistema fotovoltaico.

### 3.3.3. Inclinación de los paneles

El propósito fundamental de la inclinación de los paneles solares es optimizar la absorción de energía solar, garantizando que los rayos solares golpeen en ángulo recto sobre ellos durante la mayor parte del día y a lo largo del año. Por lo tanto, la latitud para instalar el panel es de  $-0.14303884064685474$ . El signo negativo sugiere que se encuentra al sur de la línea ecuatorial. El panel debe estar orientado hacia

el norte en una latitud de 15.1430.

### 3.3.4. Cálculo del inversor y dimensión de los string

Se conoce el número de módulos, pero no la distribución serie/paralelo. Para determinar esta distribución, se necesitan la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) del panel.

Para una configuración en serie, se debe determinar la tensión máxima del sistema (220 V en domicilios con ducha, cocina de inducción, lavadora, etc.). Este valor corresponde a la tensión de entrada del inversor. Dividiendo la tensión máxima por la tensión en vacío del panel, se obtiene la cantidad de paneles necesarios en serie.

Para la distribución en paralelo, se requiere la corriente de cortocircuito del panel y la corriente nominal del sistema. La división de estas corrientes determina el número de paneles necesarios en paralelo para el sistema fotovoltaico. Con lo explicado anteriormente, los resultados se muestran en la siguiente tabla 3.4.

Tabla 3.4: Distribución de los paneles en el sistema fotovoltaico.

<b>Serie</b>	5
<b>Paralelo</b>	1

A continuación se realizará el cálculo de la corriente, el voltaje y la potencia del inversor, los resultados son presentado en la tabla 3.3.4.

<b>Vocstring</b>	248	V
<b>Iscinversor</b>	13,93	A
<b>Pinversor</b>	2452,5	W

Finalmente, pero no menos relevante, el tipo de cable que se requerirá para llevar a cabo todas las conexiones del proyecto. Se considera una distancia máxima de 30 metros; con esa información, los resultados serán los siguientes:

<b>A</b>	3,3	mm <sup>2</sup>
<b>Calibre</b>	7,89662599	

### **3.3.5. Curvas de confiabilidad y probabilidad de pérdida de carga.**

A partir de la modelación estocástica se generaron curvas de confiabilidad que permiten evaluar el nivel de desempeño del sistema fotovoltaico en diferentes condiciones operativas. La confiabilidad se definió como la probabilidad de que el sistema sea capaz de cubrir la demanda energética sin interrupciones. Estas curvas se obtuvieron mediante la simulación de la energía disponible y la comparación con la demanda para cada uno de los escenarios generados. El análisis permitió identificar el comportamiento del sistema ante variaciones abruptas de radiación, incrementos inesperados de demanda o combinaciones simultáneas de ambos fenómenos.

Asimismo, se calculó la Probabilidad de Pérdida de Carga (Loss of Load Probability, LOLP), indicador clave que cuantifica la frecuencia con la que el sistema no puede satisfacer la demanda debido a insuficiencia de generación o almacenamiento. Este parámetro es ampliamente utilizado en la evaluación de sistemas energéticos y resulta fundamental para determinar la confiabilidad del diseño. Las simulaciones evidenciaron que el sistema dimensionado mediante el método estocástico presenta una probabilidad de pérdida de carga considerablemente menor en comparación con el diseño determinista. Esto se debe a que el modelo estocástico considera eventos extremos que no son representados por metodologías basadas en promedios. Las curvas de confiabilidad obtenidas permiten, además, ajustar la configuración del sistema según el nivel de seguridad deseado por el usuario o las exigencias normativas del mercado energético.

### **3.4. Comparación entre el diseño estocástico y el determinista.**

La comparación entre el diseño estocástico y el determinista evidencia diferencias significativas tanto en el tamaño del sistema fotovoltaico como en su desempeño energético. El enfoque determinista, basado en el uso de valores promedio de radiación y demanda, tiende a sobredimensionar la potencia del arreglo fotovoltaico y la capacidad de baterías para asegurar que el sistema pueda operar incluso en condiciones no representativas. Este sobredimensionamiento implica elevados costos de inversión y, en muchos casos, un uso ineficiente del recurso solar disponible. En contraste, el diseño estocástico incorpora la variabilidad real de los datos mediante simulaciones de Monte Carlo, lo que permite identificar configuraciones más equilibradas entre costo y confiabilidad.

Los resultados del estudio demuestran que el sistema dimensionado de manera estocástica requiere menor potencia fotovoltaica y una capacidad de batería más ajustada, manteniendo niveles de confiabilidad similares o superiores a los del diseño tradicional. Además, el análisis muestra que el diseño estocástico responde de forma más adecuada ante escenarios extremos, pues estos son incluidos como parte del proceso de simulación. La comparación cuantitativa entre ambos enfoques revela que el método estocástico puede reducir significativamente los costos de implementación sin comprometer la seguridad energética. En consecuencia, el diseño estocástico se presenta como una alternativa técnicamente más robusta y económicamente más eficiente para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en entornos con alta variabilidad del recurso solar.

#### **3.4.0.1. Sistema real**

El análisis de una simulación de Monte Carlo en relación con un sistema fotovoltaico que ya está en funcionamiento posibilita la evaluación del desempeño efectivo del sistema y la comprobación de la exactitud de la simulación. Esto permite reconocer posibles diferencias entre el modelo y el funcionamiento del sistema en la realidad, lo que a su vez puede resultar en mejoras en el diseño, la operación y el mantenimiento del sistema fotovoltaico.

#### **3.4.0.2. Sistema fotovoltaico establecido**

La Universidad Politécnica Salesiana (UPS) ha implementado sistemas fotovoltaicos, tanto en proyectos de investigación como en aplicaciones prácticas. Estos sistemas, que incluyen desde instalaciones domiciliarias en zonas rurales hasta conexiones a la red interna de la universidad, demuestran el compromiso de la UPS con la sostenibilidad y las energías renovables.

La Universidad Politécnica Salesiana (UPS) en Cuenca ha implementado un sistema fotovoltaico en su sede, específicamente en un área lateral a la cancha de fútbol, junto al estacionamiento. Este sistema, inaugurado en diciembre de 2018, tiene una capacidad de 12.6 kW y un área de 73.3 m<sup>2</sup>. Su función principal es proporcionar energía para el autoconsumo de la universidad y la carga de vehículos eléctricos, incluyendo dos motos y dos coches eléctricos de la UPS. El proyecto forma parte del programa de Renewable Energy Solutions (dena RES) y utiliza módulos tanto monocristalinos como policristalinos para explorar las diferencias de generación.

Detalles del proyecto:

- **Ubicación:** Sede Cuenca de la Universidad Politécnica Salesiana, junto al estacionamiento y al lado de la cancha de fútbol.
- **Capacidad:** 12.6 kW.
- **Área:** 73.3 m<sup>2</sup>.
- **Función:** Autoconsumo de la universidad y carga de vehículos eléctricos.
- **Tipos de módulos:** Monocristalinos y policristalinos.
- **Programa:** dena RES (Renewable Energy Solutions).
- **Inauguración:** Diciembre de 2018.

#### **3.4.0.2.1 Generación anual del sistema fotovoltaico existente**

Tiene una potencia instalada de 12,6 kW, en 2019 se han generado 17000 kWh de electricidad. El factor de planta de la instalación en este año ha alcanzado un 15,2%, generando 1333 kWh/kWp en promedio, por lo que queda demostrada las virtudes de la planta y de su pleno funcionamiento. Son los edificios de la institución los que se benefician de esta generación eléctrica.

#### **3.4.0.3. Datos del sistema**

NASA POWER ofrece datos solares y meteorológicos derivados de observaciones y modelos satelitales para ayudar a usuarios de todo el mundo a abordar los desafíos sociales. Dado que 2019 fue el año de producción de paneles, se seleccionaron los datos de irradiación solar de todo el año. Posteriormente, se calculó la producción, obteniendo un resultado similar a las estimaciones previas. La tabla 3.5, que representa los datos de un año, muestra los datos de un solo día:

Tabla 3.5: Irradiancia solar del 1 de enero de 2019

<b>Hora</b>	<b>Irradiancia (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>
06:00	38,2
07:00	229,52
08:00	450,25
09:00	613,62
10:00	674,5
11:00	724,62
12:00	735,4
13:00	637,92
14:00	450,58
15:00	386,6
16:00	242,15
17:00	93,78
18:00	4,4

#### 3.4.0.4. Simulación de Monte Carlo de la irradiación y temperatura 2019

En este apartado se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo para la temperatura y la irradiación solar. Los resultados de temperatura se muestran en la Tabla 3.6 mientras que los correspondientes a la irradiación solar se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.6: Monte Carlo: comparación de temperatura.

<b>Hora</b>	<b>Temperatura Real (°C)</b>	<b>Temperatura Simulada (°C)</b>
01:00	8,88	8,87706728
02:00	8,33	8,32110002
03:00	7,85	7,84773710
04:00	7,51	7,50162811
05:00	7,49	7,48616225
06:00	7,74	7,74551588
07:00	9,17	9,16602162
08:00	11,80	11,8077373
09:00	13,49	13,4921199
10:00	15,90	15,0950471
11:00	16,38	16,3828447
12:00	17,38	17,3109775
13:00	17,85	17,8529754
14:00	18,11	18,1310307
15:00	17,89	17,8941714
16:00	17,25	17,2522020
17:00	16,15	16,1552038
18:00	14,53	14,5377021
19:00	12,56	12,5584833
20:00	11,83	11,8208808
21:00	11,47	11,4673136
22:00	11,11	11,1157111
23:00	10,81	10,8124274
24:00	10,51	10,5153734

Tabla 3.7: Monte Carlo: comparación de Irradiancia solar.

<b>Hora</b>	<b>Irradiancia Real (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Irradiancia Simulada (W/m<sup>2</sup>)</b>
01:00	0	0
02:00	0	0
03:00	0	0
04:00	0	0
05:00	0	0
06:00	0	0
07:00	38,2	38,2281973
08:00	229,52	229,765443
09:00	450,25	450,425055
10:00	613,62	614,634033
11:00	674,5	673,022016
12:00	724,62	725,959646
13:00	735,4	735,620964
14:00	637,92	637,172690
15:00	450,58	450,138200
16:00	386,6	387,375812
17:00	242,15	242,144845
18:00	93,78	94,4496731
19:00	4,4	4,93176678
20:00	0	0
21:00	0	0
22:00	0	0
23:00	0	0
24:00	0	0

### 3.4.0.5. Generación de los paneles en el año 2019

Después de obtener la irradiación simulada y temperatura del año 2019 mediante la simulación de Monte Carlos, se procede a realizar el cálculo de la generación correspondiente. Es importante señalar que el sistema actual cuenta con dos tipos de paneles, cada uno compuesto por 22 unidades. Los detalles de los paneles se presentan en la siguiente tabla 3.8:

Tabla 3.8: Característica de los paneles existente

<b>Características</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Unidades</b>
<b>Noct</b>	41	41	<b>C</b>
<b>Rendimiento</b>	18,37	18,37	<b>%</b>
<b>Tstc</b>	25	25	<b>C</b>
<b>Tcp</b>	-0,35	-0,35	<b>%/C</b>
<b>Potencia del Panel</b>	275	300	<b>W</b>

Con la información de los paneles, se procede a determinar la generación para cada hora. se hará una comparación entre la generación simulada y la real del sistema.

Tabla 3.9: Tabla de generación por día de los paneles fotovoltaicos

Hora	Panel 300 (W)	Panel 275 (W)
07:00	284,2944017	260,6032016
08:00	291,5723994	267,2746994
09:00	300,5374044	275,4926207
10:00	308,9546742	283,2084513
11:00	315,6374709	289,3343483
12:00	319,7492852	293,1035114
13:00	320,7147489	293,9885198
14:00	319,0452116	292,4581107
15:00	314,8074241	288,5734721
16:00	308,3386171	282,6437324
17:00	300,4982666	275,4567444
18:00	292,0727455	267,73335

Como se presenta en la tabla 3.9, es necesario repetir el proceso para todo el año 2019. La generación total simulada para ese año es de 17664.0191 kWh, mientras que el dato real es de 17000 kWh, lo que resulta en un error del 3.75%, la ecuación aplicada es (3.1).

$$E_p = \frac{|x_{\text{real}} - x_{\text{medido}}|}{x_{\text{real}}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

#### 3.4.0.6. Porcentaje de error de la Generación simulada con la real

En la última sección se realizaron simulaciones adicionales con el fin de verificar la validez del porcentaje de error obtenido en la metodología propuesta. La Tabla 3.10 presenta una muestra representativa de 17 datos, donde cada dato corresponde a un día completo de operación, seleccionados a partir de un conjunto total de 365 días analizados. En dicha tabla se comparan los valores de generación real y generación simulada del sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Politécnica Salesiana.

Al comparar ambos conjuntos de datos, se observa que el porcentaje de error se mantiene cercano al

3.75% para los días analizados, con un valor promedio aproximado de 3.7%, lo que evidencia una alta concordancia entre los resultados simulados y los valores reales medidos. La consistencia del error a lo largo del período evaluado confirma el correcto funcionamiento del programa de simulación y valida la metodología empleada para la estimación de la generación energética del sistema fotovoltaico, aun cuando en el documento se presenta únicamente una parte de los datos por limitaciones de espacio.

Tabla 3.10: Porcentaje de error entre generación real y simulada

<b>Generación Real(kWh)</b>	<b>Generación Simulada(kWh)</b>	<b>Error %</b>
17000	17664,377	3,761
17000	17665,167	3,765
17000	17663,567	3,757
17000	17664,414	3,761
17000	17664,274	3,761
17000	17664,174	3,760
17000	17664,024	3,759
17000	17663,871	3,758
17000	17664,888	3,764
17000	17665,027	3,765
17000	17664,691	3,763
17000	17663,123	3,754
17000	17663,873	3,758
17000	17664,343	3,761
17000	17665,007	3,765
17000	17664,328	3,761
17000	17663,833	3,758

## **3.5. Discusión de Resultados.**

### **3.5.1. Interpretación técnica de los resultados.**

Los resultados obtenidos a lo largo del proceso de modelación y simulación del sistema fotovoltaico permiten realizar una interpretación técnica clara sobre el comportamiento energético y la confiabilidad del diseño propuesto. En primer lugar, el dimensionamiento estocástico reveló que la potencia fotovoltaica y la capacidad de baterías óptimas son menores que las estimadas mediante métodos deterministas, lo cual sugiere que la variabilidad de la radiación solar y de la demanda energética puede gestionarse de manera eficiente sin recurrir al sobredimensionamiento típico de los enfoques tradicionales. Esta reducción en la capacidad instalada no compromete el desempeño del sistema, ya que las simulaciones demostraron que la configuración recomendada ofrece altos niveles de confiabilidad y un equilibrio adecuado entre generación, almacenamiento y cobertura de la demanda. Técnicamente, esto evidencia que la incorporación de distribuciones probabilísticas en lugar de valores promedio proporciona una representación más precisa del comportamiento real del sistema energético, permitiendo identificar de forma explícita los periodos críticos en los que la energía disponible podría ser insuficiente. Asimismo, la baja discrepancia entre la generación simulada y la generación real medida en la UPS (3,75 %) confirma que el modelo desarrollado posee la capacidad de reproducir de manera fiel las condiciones operativas del sistema fotovoltaico. En conjunto, estos elementos indican que el modelo estocástico constituye una herramienta técnica confiable para la evaluación y diseño de sistemas solares en contextos con alta variabilidad.

### **3.5.2. Evaluación del desempeño bajo variabilidad solar y de demanda.**

La evaluación del desempeño del sistema bajo condiciones de variabilidad solar y demanda energética permitió identificar su comportamiento frente a escenarios complejos o no recurrentes. Gracias a la generación de numerosos escenarios mediante el método de Monte Carlo, fue posible analizar la respuesta del sistema tanto en días con baja irradiación como durante picos inesperados de consumo. Los resultados evidenciaron que el sistema mantiene un nivel aceptable de confiabilidad incluso en situaciones de reducción abrupta de la radiación, lo cual se debe a la adecuada relación entre la capacidad de almacenamiento y la potencia fotovoltaica determinada en el estudio. Por otro lado, se observó que la probabilidad de

pérdida de carga (LOLP) es considerablemente baja en la mayoría de escenarios, confirmando que el sistema puede responder correctamente ante fluctuaciones típicas del recurso solar y del comportamiento del usuario. Este comportamiento demuestra que el diseño estocástico no solo mejora la eficiencia del dimensionamiento, sino que también incrementa la resiliencia del sistema frente a condiciones adversas. La evaluación realizada pone en evidencia que la metodología propuesta permite anticipar eventos críticos que podrían pasar inadvertidos en modelos deterministas, proporcionando una visión más completa del desempeño real del sistema fotovoltaico.

### **3.5.3. Comparación con estudios similares y validación de la metodología.**

La comparación de los resultados obtenidos con estudios similares en el ámbito del dimensionamiento estocástico de sistemas fotovoltaicos permite validar la metodología empleada y situar los hallazgos dentro del contexto científico. Investigaciones previas reportan que los modelos deterministas suelen sobreestimar la potencia necesaria para satisfacer la demanda, debido a su incapacidad para representar sucesos extremos o variaciones rápidas del recurso solar. Los resultados del presente estudio coinciden con estas conclusiones, mostrando que el dimensionamiento estocástico reduce el tamaño del sistema sin afectar su confiabilidad. Asimismo, estudios académicos de países con condiciones climáticas similares, particularmente en regiones andinas, han demostrado que los métodos basados en la simulación probabilística permiten obtener diseños más eficientes y económicamente viables, debido a que consideran de forma explícita la variabilidad del clima y del consumo. La baja discrepancia entre la generación simulada y los datos reales obtenidos en la UPS constituye otro elemento de validación, ya que confirma la capacidad predictiva del modelo y respalda su aplicabilidad práctica. En conjunto, la similitud de los resultados con investigaciones externas y la coherencia interna del análisis refuerzan la validez de la metodología estocástica utilizada, demostrando su utilidad como herramienta de diseño para sistemas fotovoltaicos en entornos con alta incertidumbre.

## **3.6. Análisis de Datos**

En este capítulo se exponen los resultados del diseño de un sistema fotovoltaico, específicamente para la vivienda de los autores, y se lleva a cabo una comparación con un sistema fotovoltaico ya existente

en la Universidad Politécnica Salesiana. Los datos utilizados para dimensionar el sistema fotovoltaico se obtuvieron de la demanda a partir de la planilla de consumo eléctrico proporcionada por la empresa eléctrica CENTROSUR, y la irradiación solar; en ambos casos, estos datos fueron extraídos de la página de la NASA. La recopilación de los datos de demanda permite obtener una visión general del comportamiento de la carga, lo que es fundamental para crear el perfil de carga de la vivienda. En cuanto a la Universidad Politécnica Salesiana, la generación de su sistema fotovoltaico tendrá resultados similares a los datos obtenidos del método de simulación de Monte Carlo.

# Capítulo 4

## CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones generales

- La simulación de Monte Carlo es una herramienta fundamental para evaluar la eficiencia y confiabilidad de sistemas fotovoltaicos, ya que permite modelar la incertidumbre en variables como la radiación solar, temperatura y demanda, lo que facilita tomar decisiones en el diseño y en la operación del sistema.
- La implementación de sistemas fotovoltaicos requiere una evaluación exhaustiva del consumo energético, que incluye análisis de patrones de uso, potencial solar del sitio y la elección de componentes adecuados, además de aplicar simulaciones como el método de Monte Carlo para optimizar el dimensionamiento y reducir riesgos relacionados con las variaciones climáticas y de carga.
- La evaluación de la simulación de Monte Carlo al sistema existente muestra una precisión con un error de 3.75 %, lo que valida la programación realizada.
- En las figuras de temperatura, demanda e irradiación solar, se perciben diferencias significativas entre los datos reales y simulados que están ligadas al número de iteraciones: a mayor número de iteraciones del método de Monte Carlo, más escenarios posibles se generan, lo que disminuye el margen de error.

## 4.2. Recomendaciones técnicas

- Incorporar sistemas de supervisión para evaluar continuamente la generación, temperatura y rendimiento del sistema, para facilitar el mantenimiento predictivo y la detección temprana de fallas.
- Seleccionar componentes de alta calidad y eficiencia, incluyendo paneles solares, inversores y baterías, adecuados a las necesidades específicas del proyecto y al presupuesto disponible.
- Seleccionar una ubicación sin sombra y con buena exposición solar, si es el caso, eliminar o podar obstáculos como árboles y edificios cercanos para evitar pérdidas de producción.
- Establecer un programa de mantenimiento periódico, que incluya limpieza de paneles y revisión de conexiones, para mantener el rendimiento del sistema en niveles óptimos a largo plazo.
- Relacionado con la cuarta conclusión, se recomienda el programa con un mayor número de iteraciones para minimizar el margen de error.

## 4.3. Recomendaciones para investigaciones futuras

- Para futuros trabajos de investigación se recomienda ampliar y perfeccionar la modelación estocástica utilizada en el presente estudio. Una línea de mejora consiste en incorporar modelos probabilísticos más avanzados que consideren correlaciones temporales entre variables como la irradiancia, la temperatura y la demanda energética. La inclusión de modelos estocásticos dinámicos, como cadenas de Markov o procesos autoregresivos, permitiría capturar con mayor precisión la dependencia entre días consecutivos y la presencia de patrones cíclicos. Además, podría evaluarse el uso de algoritmos de inteligencia artificial aplicados a la generación de escenarios, tales como redes neuronales bayesianas o modelos generativos probabilísticos, que permitirían simular condiciones climáticas extremas con mayor realismo. Otra mejora relevante sería la optimización multicriterio integrada al modelo estocástico, considerando simultáneamente aspectos técnicos, económicos y ambientales, lo que proporcionaría un dimensionamiento más robusto y equilibrado del sistema fotovoltaico.
- Una línea de investigación con gran potencial es la ampliación del modelo hacia sistemas híbridos

que integren otras fuentes de energía renovable. La incorporación de microturbinas eólicas, biomasa o pequeñas centrales hidroeléctricas podría mejorar significativamente la confiabilidad del sistema, especialmente en periodos prolongados de baja irradiación solar. De igual manera, resulta pertinente estudiar la integración del sistema con la red eléctrica bajo esquemas de medición neta o intercambio bidireccional de energía, lo cual permitiría evaluar diferentes estrategias de operación, tales como la priorización de autoconsumo, la inyección de excedentes o la compra de energía en momentos de déficit. Estas alternativas podrían ser analizadas mediante nuevas simulaciones estocásticas que consideren la disponibilidad variable de diferentes fuentes, las fluctuaciones de precios del mercado eléctrico y las normativas locales, proporcionando un modelo más completo y adaptable a diversos contextos energéticos.

- Finalmente, se recomienda continuar con la investigación utilizando bases de datos más amplias en términos temporales y geográficos. Una mayor cantidad de datos de irradiancia y consumo permitiría mejorar la representatividad estadística de las distribuciones ajustadas y, por ende, la precisión de las simulaciones. Además, extender el estudio a otras zonas climáticas del Ecuador como la región costera, la Amazonía o zonas de alta montaña permitiría evaluar la aplicabilidad del modelo en entornos con condiciones meteorológicas significativamente distintas. Esto no solo contribuiría a validar la metodología propuesta, sino que también permitiría generar recomendaciones específicas para cada región, considerando su perfil energético particular y sus características ambientales. Asimismo, utilizar datos provenientes de múltiples estaciones meteorológicas o satelitales podría mejorar la robustez del análisis y abrir la puerta a estudios comparativos entre técnicas de medición y fuentes de información climática.

# Bibliografía

- [1] K. R. Pantaleón Iñiguez and K. A. Tumbaco Chumo, “Generación de energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico off grid en la zona rural de guayaquil,” B.S. thesis, 2023.
- [2] A. L. Hidalgo Rocha, “Diseño de un sistema de energía fotovoltaica para la facultad de ciencias ambientales de la universidad internacional sek,” Ph.D. dissertation, Universidad Internacional SEK, 2015.
- [3] M. Y. Sacón Loor and C. A. Vera Sacón, “Sistema solar fotovoltaico aislado para el suministro de energía eléctrica de una vivienda en la comunidad rural mocochoal, calceta,” B.S. thesis, Calceta: ESPAM MFL, 2023.
- [4] J. A. Alonso, “¿Cuántas placas solares necesarias por consumo, m2 y potencia? | SunFields — sfe-solar.com,” <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/cuantos-necesarios/#:~:text=Para%20calcular%20cu%C3%A1ntos%20paneles%20solares,potencia%20de%20tus%20paneles%20solares.>, 2025, [Accessed 29-07-2025].
- [5] O. Noguera-Salas, R. A. Pinto-García, and J. E. Villarreal-Padilla, “La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares,” *Iteckne*, vol. 15, no. 1, pp. 7–16, 2018.
- [6] H. M. de Andrade and N. Brandalise, “Análise de viabilidade econômico-financeira, pelo método de monte carlo, de um sistema fotovoltaico para geração distribuída,” *Sistemas & Gestão*, vol. 14, no. 4, 2020.
- [7] S. Dukkupati, V. Sankar, and P. S. Varma, “Forecasting of solar irradiance using probability distri-

- butions for a pv system: A case study,” *International journal of renewable energy research*, vol. 9, no. 2, pp. 741–748, 2019.
- [8] J. Dong, M. M. Olama, T. Kuruganti, A. M. Melin, S. M. Djouadi, Y. Zhang, and Y. Xue, “Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 333–346, 2020.
- [9] A. Abubakar, R. N. Borkor, and P. Amoako-Yirenkyi, “Stochastic optimal selection and analysis of allowable photovoltaic penetration level for grid-connected systems using a hybrid nsgaii-mopso and monte carlo method,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2023, no. 1, p. 5015315, 2023.
- [10] J. An, D.-K. Kim, J. Lee, and S.-K. Joo, “Least squares monte carlo simulation-based decision-making method for photovoltaic investment in korea,” *Sustainability*, vol. 13, no. 19, p. 10613, 2021.
- [11] J. Dong, M. M. Olama, T. Kuruganti, A. M. Melin, S. M. Djouadi, Y. Zhang, and Y. Xue, “Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 333–346, 2020.
- [12] F. Laurentiu, D. Alexandru, C. Dan, and F. Silvian, “Forecasting of energy production for photovoltaic systems based on arima and ann advanced models [j],” *International Journal of Photoenergy*, 2021, pp. 1–19, 2021.
- [13] D. Du, Y. Zhang, X. Li, and N. Xiao, “First-principles calculations, machine learning and monte carlo simulations of the magnetic coercivity of fexco1 bulks and nanoclusters,” *Nanomaterials*, vol. 15, no. 8, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-4991/15/8/577>
- [14] L. Bin, R. Abbas, M. Shahzad, and N. Safdar, “Probabilistic load flow analysis using nonparametric distribution,” *Sustainability*, vol. 16, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/240>
- [15] K. Duwadi, A. Ingalalli, and T. M. Hansen, “Monte carlo analysis of high penetration residential solar voltage impacts using high performance computing,” in *2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2019, pp. 1–6.

- [16] M. S. Hashish, H. M. Hasanien, H. Ji, A. Alkuhayli, M. Alharbi, T. Akmaral, R. A. Turkey, F. Jurado, and A. O. Badr, "Monte carlo simulation and a clustering technique for solving the probabilistic optimal power flow problem for hybrid renewable energy systems," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/783>
- [17] P. Á. Pisco Gómez and B. I. Ortiz Choez, "Sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica a una casa promedio en la zona rural de la comunidad el cóndor en la provincia del guayas," Ecuador, 2025.
- [18] X. R. Song, L. Wang, X. Ying, Y. Bai, and L. Li, "Research of off-grid household photovoltaic power system," *Advanced Materials Research*, vol. 1008–1009, pp. 44–48, 2014.
- [19] C. Energetico, "¿Cómo elegir las placas solares para mi autoconsumo? — cambioenergetico.com," <https://www.cambioenergetico.com/blog/como-elegir-placas-solares/>, 2023, [Accessed 29-07-2025].
- [20] Oscagas, "Cómo elegir Paneles Solares - Oscagas.es — oscagas.es," <https://www.oscagas.es/guia-definitiva-tipos-de-paneles-solares-para-elegir-en-tu-hogar/#:~:text=%C2%BFcu%C3%A1les%20son%20los%20factores%20a,y%20la%20solvencia%20del%20mismo.,> 2024, [Accessed 29-07-2025].
- [21] E. Perú, "¿Qué son los paneles solares y cómo funcionan? | Ecoflow Perú — ecoflowstore.pe," <https://ecoflowstore.pe/que-son-los-paneles-solares/#:~:text=Los%20paneles%20solares%20son%20dispositivos,las%20fuentes%20de%20energ%C3%ADa%20tradicionales.,> 2024, [Accessed 29-07-2025].
- [22] Helius, "¿Cómo saber qué inversor necesito? - Helius Solar — helius.cl," <https://www.helius.cl/paneles-fotovoltaicos/como-saber-que-inversor-solar-necesito/#:~:text=Elegir%20el%20inversor%20que%20necesitas,al%20menos%20sea%20de%203Kw.,> 2025, [Accessed 29-07-2025].
- [23] Ecoflow, "Solar Inverter Guide: Power Your Home with the Right Choice | EcoFlow CA — ecoflow.com," <https://www.ecoflow.com/us/blog/the-complete-guide-to-solar-inverters>, 2023, [Accessed 29-07-2025].

- [24] Repsol, “¿Qué es un contador bidireccional y para qué sirve? — repsol.es,” <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/que-es-contador-bidireccional/#:~:text=una%20misma%20instalaci%C3%B3n-,Comprar%20o%20alquilar%20el%20contador%20bidireccional:%20%C2%BFcu%C3%A1%20es%20la%20mejor,uno%20en%20tu%20sistema%20fotovoltaico.,2024>, [Accessed 29-07-2025].
- [25] Tarifasdeluz, “Medidores bidireccionales para paneles solares | Conéctalo a la CFE — tarifasdeluz.mx,” <https://tarifasdeluz.mx/autoconsumo/componentes/medidor-bidireccional#:~:text=equipo%20en%20particular-,%C2%BFcu%C3%A1ntos%20contadores%20necesito%20en%20una%20instalaci%C3%B3n%20de%20autoconsumo?,instalar%20un%20segundo%20medidor%20bidireccional.,2023>, [Accessed 29-07-2025].
- [26] Sems, “¿Qué es el Medidor Bidireccional y para qué sirve? | Paneles Solares en Guadalajara — panelessolaresenguadalajara.com,” <https://panelessolaresenguadalajara.com/recursos/que-es-el-medidor-bidireccional-y-para-que-sirve/#:~:text=Un%20medidor%20Bidireccional%20es%20un,para%20contar%20tu%20energ%C3%ADa%20consumida.,2024>, [Accessed 29-07-2025].
- [27] Bright, “¿Cómo se lee el medidor bidireccional de la CFE? — brightsupport.zendesk.com,” <https://brightsupport.zendesk.com/hc/es/articles/4402785664653--C%C3%B3mo-se-lee-el-medidor-bidireccional-de-la-CFE#:~:text=Para%20obtener%20el%20consumo%20y,lectura%20actual%20del%20%C3%BAltimo%20recibo.,2024>, [Accessed 29-07-2025].
- [28] Slocable, “How to Choose the Correct Solar DC Cable for Solar PV System? — slocable.com.cn,” <https://www.slocable.com.cn/es/news/how-to-choose-the-correct-dc-cable-for-solar-pv-system/>, 2020, [Accessed 29-07-2025].
- [29] FrCable, “Solar DC Cables : A Full Comprehensive Guide — fr-cable.com,” <https://www.fr-cable.com/post/solar-dc-cables-a-full-comprehensive-guide#:~:text=5.2%20Consideraci%C3%B3n%20de%20factores%20ambientales,a%20la%20luz%20solar%20directa.,2024>, [Accessed 29-07-2025].
- [30] Prysmian, “Cálculo de las fórmulas para obtener la sección por caída de tensión,” <https://www.prysmianclub.es/no1-calculo-para-obtener-la-seccion-por-caida-de-tension-ejemplo-de-calculo/#:~:>

text=La%20ca%C3%ADda%20de%20tensi%C3%B3n%20en%20voltios%20es%20%CE%94U%20=%205%C3%97400/100%20=%2020%20V., 2025, [Accessed 28-07-2025].

[31] Solis, “Seminario Solis Episodio 19: CF3mo seccionar el cable de CA para sistemas solares fotovoltaicos — solisinverters.com,” [\[32\] Adime, “Adime | — adime.org,” \[\\[33\\] William, “¿Cuál es la diferencia entre AC MCB y DC MCB? - GEYA Eléctrica — geya.net,” \\[\\\[34\\\] ASEMIET, “¿Qué protecciones eléctricas son obligatorias en viviendas e industrias según la normativa actual? — asemiet.es,” \\\[\\\\[35\\\\] Solarama, “7 Protecciones eléctricas para Sistemas Fotovoltaicos — solarama.mx,” \\\\[\\\\\[36\\\\\] Albasolar, “Elementos de protección de la instalación fotovoltaica - Albasolar — albasolar.es,”\\\\]\\\\(https://solarama.mx/blog/protecciones-electricas-para-sistemas-fotovoltaicos/, 2025, \\\\[Accessed 29-07-2025\\\\].</a></p></div><div data-bbox=\\\\)\\\]\\\(https://asemiet.es/que-protecciones-electricas-son-obligatorias-en-viviendas-e-industrias-segun-la-normativa-actual/#:~:text=Capacidad%20de%20corte%20y%20calibraci%C3%B3n%20La%20capacidad,calibraci%C3%B3n%20de%20las%20protecciones%20debe%20realizarse%20considerando:, 2025, \\\[Accessed 29-07-2025\\\].</a></p></div><div data-bbox=\\\)\\]\\(https://www.geya.net/es/dc-mcb-and-ac-mcb/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20MCB%20de%20CC,y%20paquetes%20de%20bater%C3%ADas%20fotovoltaicas., 2021, \\[Accessed 29-07-2025\\].</a></p></div><div data-bbox=\\)\]\(https://www.adime.org/noticias/como-seleccionar-correctamente-cables-fotovol/#:~:text=Secci%C3%B3n%20transversal:%20la%20secci%C3%B3n%20transversal,una%20conexi%C3%B3n%20segura%20y%20fiable., 2023, \[Accessed 29-07-2025\].</a></p></div><div data-bbox=\)](https://www.solisinverters.com/mx/documentation/222c90e41b894b3e9b9552bc780d7075.html#:~:text=%EF%BC%9E%2027.3A-,P%C3%A9rvida%20de%20voltaje:%E2%96%B3U=%EF%BC%88I*L*,mm2%20es%20la%20mejor%20opci%C3%B3n., 2021, [Accessed 29-07-2025].</a></p></div><div data-bbox=)

- [37] H. M. de Andrade and N. Brandalise, “Análise de viabilidade econômico-financeira, pelo método de monte carlo, de um sistema fotovoltaico para geração distribuída,” *Sistemas & Gestão*, vol. 14, no. 4, pp. 348–355, 2019.
- [38] S. Linkers, “Cómo diseñar sistemas fotovoltaicos a partir de facturas de luz - Solar Linkers — solarlinkers.com,” <https://www.solarlinkers.com/como-disenar-sistemas-fotovoltaicos-a-partir-de-facturas-de-luz/>, 2024, [Accessed 31-07-2025].
- [39] S. Energy, “Dimensionamiento de un proyecto Fotovoltaico Híbrido - S&G Colombia — sygenergy.co,” <https://www.sygenergy.co/2024/04/04/dimensionamiento-de-un-proyecto-fotovoltaico-hibrido/#:~:text=1.%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Necesidades%20Energ%C3%A9ticas%20An%C3%A1lisis%20de,se%20necesita%20m%C3%A1s%20energ%C3%ADa%20y%20cu%C3%A1ndo%20menos.>, 2022, [Accessed 31-07-2025].
- [40] S. Dukkipati, V. Sankar, and P. S. Varma, “Forecasting of solar irradiance using probability distributions for a pv system: A case study,” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 9, no. 2, pp. 741–748, 2019.
- [41] J. Dong, M. M. Olama, T. Kuruganti, A. M. Melin, S. M. Djouadi, Y. Zhang, and Y. Xue, “Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 333–346, 2020.
- [42] J. Insa, “Como afecta la temperatura a una placa solar — monsolar.com,” [https://www.monsolar.com/blog/como-afecta-la-temperatura-a-una-placa-solar-2/#:~:text=La%20temperatura%20de%20trabajo%20de%20la%20c%C3%A9lula,la%20c%C3%A9lula%20\(%C2%BAC\)%20\\*%20G:%20irradiancia%20\(W/m2\)](https://www.monsolar.com/blog/como-afecta-la-temperatura-a-una-placa-solar-2/#:~:text=La%20temperatura%20de%20trabajo%20de%20la%20c%C3%A9lula,la%20c%C3%A9lula%20(%C2%BAC)%20*%20G:%20irradiancia%20(W/m2)), 2020, [Accessed 31-07-2025].
- [43] T. Vargas, “TRAZADOR DE CURVAS I-V DE C D3;DIGO ABIERTO PARA MONITOREO DE RENDIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN BOLIVIA — scielo.org.bo,” [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2518-44312014000100007#:~:text=Para%20NOCT%20\(Temperatura%20Nominal%20de%20Operaci%C3%B3n%20de,T%20A%20\(Temperatura%20Ambiente\)%20se%20emplean%2025%C2%BAC.](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312014000100007#:~:text=Para%20NOCT%20(Temperatura%20Nominal%20de%20Operaci%C3%B3n%20de,T%20A%20(Temperatura%20Ambiente)%20se%20emplean%2025%C2%BAC.), 2014, [Accessed 31-07-2025].

- [44] C. Lane, “¿Cuánta energía produce un panel solar? — solarreviews.com,” <https://www.solarreviews.com/es/blog/cuanta-electricidad-produce-un-panel-solar>, 2023, [Accessed 31-07-2025].
- [45] S. Plus, <https://www.solarnplus.com/how-much-energy-does-a-solar-panel-produce/#:~:text=Producci%C3%B3n%20diaria%20de%20energ%C3%ADa,sombras%20pueden%20reducir%20esta%20cifra.>, 2024, [Accessed 31-07-2025].
- [46] FasterCapital, “Aplicaciones De La Simulación Monte Carlo En Ingeniería - FasterCapital — fastercapital.com,” <https://fastercapital.com/es/tema/aplicaciones-de-la-simulaci%C3%B3n-monte-carlo-en-ingenier%C3%ADa.html/1#:~:text=La%20creaci%C3%B3n%20de%20un%20modelo,la%20simulaci%C3%B3n%20de%20variables%20aleatorias.>, 2024, [Accessed 29-07-2025].
- [47] S. Coma, “Método Montecarlo: Simula y toma decisiones acertadas [2025] • Asana — asana.com,” <https://asana.com/es/resources/montecarlo-method>, 2025, [Accessed 29-07-2025].
- [48] G. D. María, “Análisis de monte carlo,” <https://www.powerelectronicsnews.com/guide-to-spice-simulation-for-circuit-analysis-and-design-part-10-monte-carlo-analysis/#:~:text=Monte%20Carlo%20analysis%20can%20be,a%20circuit%2C%20increasing%20its%20reliability.>, 2024, [Accessed 28-07-2025].
- [49] R. Martin, “Simulación y análisis del rendimiento de un sistema fotovoltaico de 45 kW interconectado a la red de una planta purificadora en Escuintla, Campeche | Tendencias en energías renovables y sustentabilidad — aldeser.org,” <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/229#:~:text=Seguido%20de%20esto%2C%20se%20proyecta%20una%20producci%C3%B3n, valores%20diferenciales%20para%20tener%20proyecciones%20equivalentes%20respectivamente.>, 2024, [Accessed 29-07-2025].