



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba

DIANA ESTEFANÍA AGUIRRE RUIZ

Trabajo de Titulación modalidad Tesis, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN FÍSICA

RIOBAMBA – ECUADOR

JUNIO

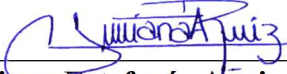
Yo, Diana Estefanía Aguirre Ruiz, declaro que el presente Trabajo de Titulación modalidad Tesis, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, junio de 2024

© 2024, Diana Estefanía Aguirre Ruiz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.


Diana Estefanía Aguirre Ruiz
C.I.: 0604577593



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación, modalidad Tesis, titulado **Modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba**, de responsabilidad de la señorita Diana Estefanía Aguirre Ruiz, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos y legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

Dr. Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez, Mgtr.

PRESIDENTE

Dr. Arquímedes Xavier Haro Velastegui, Ph.D

DIRECTOR

Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes, Ph.D

MIEMBRO

Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo, Mgtr.

MIEMBRO

Riobamba, junio 2024

TABLA DE CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	xiii
SUMMARY	xiv

CAPÍTULO I

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema	2
1.2	Situación de la problemática.....	2
1.3	Formulación del problema.....	2
1.4	Justificación.....	3
<i>1.4.1</i>	<i>Justificación teórica.....</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Justificación práctica.....</i>	<i>3</i>
<i>1.4.3</i>	<i>Justificación metodológica.....</i>	<i>3</i>
1.5	Objetivo general.....	3
1.6	Objetivos específicos.....	4
1.7	Hipótesis	4

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO.....	5
2.1	Marco referencial	5
2.2	Energía solar	7
<i>2.2.1</i>	<i>Radiación solar.....</i>	<i>7</i>
2.3	Efecto fotovoltaico	10
<i>2.3.1</i>	<i>Células fotovoltaicas.....</i>	<i>10</i>

2.4	Física de los semiconductores	11
2.4.1	<i>Cristales de impurezas n y p</i>	12
2.4.1.1	<i>Propiedades de la unión p-n</i>	13
2.4.2	<i>Propiedades del Silicio y del Germanio</i>	14
2.5	Paneles fotovoltaicos.....	15
2.5.1	<i>Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos</i>	16
2.5.1.1	<i>Corriente (I), Voltaje (V), Resistencia (R) y Potencia (P).....</i>	17
2.5.1.2	<i>Ley de Ohm.....</i>	18
2.5.2	<i>Principales tipos de paneles fotovoltaicos.....</i>	18
2.6	Identificación de variables	21
2.7	Operacionalización de variables.....	21
2.7.1	<i>Operacionalización de variables independientes.....</i>	21
2.7.2	<i>Operacionalización de las variables dependientes.....</i>	22
2.8	Matriz de consistencia	23

CAPÍTULO III

3	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	24
3.1	Tipo y diseño de la investigación	24
3.2	Método de investigación.....	24
3.3	Enfoque de la investigación.....	24
3.4	Alcance de la investigación	25
3.5	Técnica de recolección de datos.....	25
3.6	Tratamiento de los datos	26
3.7	Condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba	26
3.7.1	<i>Radiación solar y potencial de energía fotovoltaica.....</i>	29
3.8	Análisis de los datos de la Estación Metereológica	31
3.8.1	<i>Preparación de los datos.....</i>	31

3.8.1.1	<i>Conversión de datos horarios de UTC a la hora local en Ecuador para análisis de los datos meteorológicos.....</i>	31
3.8.1.2	<i>Flujograma para la preparación de los datos de la estación meteorológica.....</i>	31
3.8.2	<i>Análisis estadístico de los datos.....</i>	32
3.9	Descripción del modelo	33
3.9.1	<i>Ecuación del diodo no-ideal, unión p-n.....</i>	33
3.9.2	<i>Circuito equivalente del panel fotovoltaico.....</i>	34
3.9.2.1	<i>Determinación de los parámetros involucrados en la ecuación del circuito equivalente del panel fotovoltaico.</i>	36
3.9.2.2	<i>Determinación de los parámetros involucrados en la ecuación del circuito equivalente del panel fotovoltaico, en condiciones reales.....</i>	39
3.10	Validación del modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba	41
3.10.1	<i>Metodología de validación propuesta para el modelo</i>	41

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1	Análisis del comportamiento de la radicación solar y temperatura en la ciudad de Riobamba	43
4.1.1	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2015.....</i>	44
4.1.2	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2016.....</i>	45
4.1.3	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2017.....</i>	46
4.1.4	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2019.....</i>	47
4.1.5	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2020.....</i>	48
4.1.6	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2021.....</i>	49
4.1.7	<i>Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2022.....</i>	50
4.2	Caracterización del panel Fotovoltaico GP-100P-36.....	53

4.3	Modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba	55
4.3.1	<i>Comportamiento del panel fotovoltaico GP-100P-36 bajo condiciones reales.....</i>	55
4.3.2	<i>Validación del modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba.....</i>	56
4.3.2.1	<i>Caracterización y simulación para $G=747\text{ W/m}^2$ y $T=19.4^\circ\text{C}$</i>	58
4.3.2.2	<i>Caracterización y simulación para $G=93\text{ W/m}^2$ y $T=13.1^\circ\text{C}$</i>	59
4.3.2.3	<i>Caracterización y simulación para $G=186\text{ W/m}^2$ y $T=15.2^\circ\text{C}$</i>	59
4.3.2.4	<i>Caracterización y simulación para $G=724\text{ W/m}^2$ y $T=20.5^\circ\text{C}$</i>	60
4.3.2.5	<i>Caracterización y simulación para $G=927\text{ W/m}^2$ y $T=19.7^\circ\text{C}$</i>	60
4.3.2.6	<i>Caracterización y simulación para $G=262\text{ W/m}^2$ y $T=15.1^\circ\text{C}$</i>	61
4.4	Predicción de la Corriente y Voltaje.....	62
5	PROPUESTA	
5.1	Resultados Esperados.....	65
5.2	Impacto y Utilidad.....	66
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES.....	68
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Propiedades físicas y químicas del Germanio y el Silicio.....	14
Tabla 2-2:	Resumen de la Ley de Ohm.....	18
Tabla 3-2:	Rango de potencia de los paneles fotovoltaicos en función al número de células	20
Tabla 4-2:	Operacionalización de las variables independientes.....	21
Tabla 5-2:	Operacionalización de la variable dependiente	22
Tabla 6-2:	Matriz de consistencia	23
Tabla 1-3:	Condiciones físicas y meteorológicas de Riobamba	28
Tabla 1-4:	Especificaciones eléctricas	53
Tabla 2-4:	Coefficientes de temperatura	53
Tabla 3-4:	Características mecánicas.....	54
Tabla 4-4:	Datos de salida del panel fotovoltaico y la estación meteorológica	57
Tabla 5-4:	Error entre la I_{sc} Modelada y la I_{sc} Real.....	61

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Procedimiento para la estandarización de datos de la estación meteorológica	31
Gráfico 2-3:	Metodología para el análisis estadístico de los datos	32
Gráfico 3-3:	Metodología de validación del modelo	41
Gráfico 1-4:	Radiación y temperatura durante el año 2015	44
Gráfico 2-4:	Radiación y temperatura durante el año 2016	45
Gráfico 3-4:	Radiación y temperatura durante el año 2017	46
Gráfico 4-4:	Radiación y temperatura durante el año 2019	47
Gráfico 5-4:	Radiación y temperatura durante el año 2020	48
Gráfico 6-4:	Radiación y temperatura durante el año 2021	49
Gráfico 7-4:	Radiación y temperatura durante el año 2022	50
Gráfico 8-4:	Comportamiento de la radiación promedio anual.....	51
Gráfico 9-4:	Comportamiento de la temperatura promedio anual	51
Gráfico 10-4:	Curvas del panel fotovoltaico: a) Curva característica b) Curva en condiciones ideales $R=1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$ c) Curva a $R=825\text{W/m}^2$ y $T=23,5^\circ\text{C}$ y d) Curva $R=645 \text{ W/m}^2$ y $T=20^\circ\text{C}$	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Espectro electromagnético	8
Figura 2-2:	Radiación solar.....	9
Figura 3-2:	Principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica	10
Figura 4-2:	Bandas de energía - Par electrón-hueco	11
Figura 5-2:	Impurezas a) n-donadora b) p-aceptora	12
Figura 6-2:	Unión p-n	13
Figura 2-7:	Curva característica de un panel fotovoltaico	15
Figura 8-2:	Funcionamiento de un panel solar fotovoltaico	17
Figura 9-2:	Ley de Ohm.....	18
Figura 10-2:	Tipos de paneles fotovoltaicos: a) Monocristalino b) Policristalino c) Película fina	20
Figura 1-3:	Tratamiento de los datos para la investigación	26
Figura 2-3:	Ubicación geográfica de la ciudad de Riobamba. a) América Latina b) Ecuador c) Chimborazo d) Riobamba	27
Figura 3-3:	Ubicación de la Estación Meteorológica - ESPOCH	29
Figura 4-3:	Mapa de recurso solar: a) Irradiancia normal directa b) Potencial de energía fotovoltaica.....	30
Figura 5-3:	Circuito equivalente unión p-n.....	33
Figura 6-3:	Circuito equivalente de una celda solar.....	34
Figura 7-3:	Circuito para determinar I_{Rsh}	35
Figura 1-4:	Curvas características del panel fotovoltaico a 25°C	54
Figura 2-4:	Simulación para $G=747 \text{ W/m}^2$ y $T=19.4^\circ\text{C}$	58
Figura 3-4:	Simulación para $G=93 \text{ W/m}^2$ y $T=13.1^\circ\text{C}$	59
Figura 4-4:	Simulación para $G=186 \text{ W/m}^2$ y $T=15.2^\circ\text{C}$	59
Figura 5-4:	Simulación para $G=724 \text{ W/m}^2$ y $T=20.5^\circ\text{C}$	60
Figura 6-4:	Simulación para $G= 927 \text{ W/m}^2$ y $T=19.7^\circ\text{C}$	60
Figura 7-4:	Simulación para $G= 262 \text{ W/m}^2$ y $T=15.1^\circ\text{C}$	61
Figura 4-8:	Corriente, Voltaje y Potencia para el 17 de enero de 2024 a las 9h00.....	62
Figura 9-4:	Corriente, Voltaje y Potencia para el 10 de abril de 2024 a las 17h00	63
Figura 10-4:	Corriente, Voltaje y Potencia para el 17 de septiembre de 2024 a las 15h00	63

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** FICHA TÉCNICA DEL PANEL FOTOVOLTAICO GP-100P-36
- ANEXO B:** CÓDIGO EN MATLAB PARA EL MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA BAJO CONDICIONES FÍSICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA
- ANEXO C:** INTERFAZ DE USUARIO EN MATLAB
- ANEXO D:** DATOS DE SALIDA DEL PANEL FOTOVOLTAICO Y LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PARA LA SEMANA DEL 01 AL 07 DE ENERO DE 2024

RESUMEN

El objetivo de este trabajo investigativo fue establecer un modelo de aprovechamiento de energía solar usando paneles fotovoltaicos, que se adapte a las condiciones físicas y meteorológicas particulares de Riobamba, ubicada en la provincia de Chimborazo - Ecuador. Se adoptó una metodología de investigación mixta, combinando el modelo teórico con la validación experimental y la simulación computacional, que parte del circuito y ecuación general del diodo, en donde se introducen dos resistencias en serie y en paralelo, para obtener el circuito equivalente del panel fotovoltaico, que a la vez permite determinar la ecuación para la corriente de salida; y, dada la naturaleza de las ciencias físicas y del modelo de generación, que implica mediciones y modelos matemáticos, se consideró una investigación de tipo cuantitativa, lo que permitió recopilar y analizar datos numéricos bajo condiciones específicas, considerando principalmente factores como la radiación solar, la temperatura ambiente y las propiedades físicas del panel fotovoltaico. Los resultados obtenidos mediante la validación del modelo presentaron errores que varían del 2% al 7%, lo que permitió afirmar que el modelo tiene una alta eficacia, concluyendo que en la ciudad de Riobamba es posible optimizar el uso de energía solar, ya que se pudo demostrar la viabilidad de generación de energía fotovoltaica y en consecuencia su aporte al desarrollo sostenible. Se recomienda ampliar el modelo de generación incluyendo variables como: la humedad, precipitación y sombreado, para obtener resultados adaptados a las condiciones locales con mayor precisión, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones e implementaciones práctica de soluciones energéticas sostenibles en Riobamba.

Palabras clave: <ENERGÍA SOLAR>, <CONDICIONES FÍSICAS>, <CONDICIONES METEREOLÓGICAS>, <PANEL FOTOVOLTAICO>, <RADIACIÓN>.



0048-DBRAI-UPT-DP-2024

07-06-2024

SUMMARY

The objective of this research was to establish a model to take advantage of solar energy photovoltaic panels, which are adapted to the particular physical and meteorological conditions of Riobamba, located in the Chimborazo province in Ecuador. A mixed of research methodology was adopted, combining the theoretical model with experimental validation and computational simulation, which starts from the circuit and the general equation of the diode. Here, two resistors are introduced in series and in parallel to obtain the equivalent circuit of the photovoltaic panel, which at the same time allows setting the equation for the current output. Given the nature of the physical sciences and the generation model, which involves measurements and mathematical models, a quantitative research was considered, which made it possible to collect and analyze numerical data under specific conditions, mainly considering factors such as solar radiation, the ambient temperature and physical properties of the photovoltaic panel. The results obtained through the validation of the model presented errors that varied from 2% to 7%, which allowed us to prove that the model has a high level of efficiency. Thus, concluding that in the city of Riobamba it is possible to optimize the use of solar energy, since it was possible to demonstrate the viability of photovoltaic energy generation and consequently its contribution to sustainable development. Therefore, it is recommended to expand the generation model by including variables such as: humidity, precipitation and shading, to obtain results adapted to local conditions with greater precision, establishing a solid foundation for future research and practical implementation of sustainable energy solutions in Riobamba.

Keywords: <SOLAR ENERGY>, <PHYSICAL CONDITIONS>, <METEOROLOGICAL CONDITIONS>, <PHOTOVOLTAIC PANEL>, <RADIATION>.



0048-DBRAI-UPT-DP-2024

07-06-2024

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la búsqueda de fuentes de energías sostenibles y renovables se ha convertido en una prioridad en un mundo que enfrenta desafíos energéticos y ambientales sin precedentes, cuya población va en crecimiento constante, provocando el agotamiento de energías no renovables; y, obligando a las industrias a avanzar a pasos gigantes, sin embargo, gracias al aporte de grupos ambientalistas y gobiernos más conscientes, se ha convertido en una necesidad urgente adoptar fuentes de energía alternativas .

La energía solar, con su abundancia y capacidad ha emergido como una solución prometedora para generar energía eléctrica limpia, desafiando al cambio climático, que viene siendo una problemática global en pleno siglo XXI. En este contexto, la ciudad de Riobamba, en un entorno geográfico privilegiado con una alta radiación solar, se presenta como un lugar idóneo para el aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos, siendo una oportunidad estratégica para impulsar el desarrollo sostenible y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovable

Este trabajo de investigación se propone abordar de manera integral la modelación del aprovechamiento de la energía solar en Riobamba, explorando las diversas facetas de esta tecnología innovadora y su aplicación en un entorno urbano único. El presente estudio representa un paso significativo hacia la comprensión de cómo los paneles fotovoltaicos pueden contribuir de manera efectiva a la matriz energética de Riobamba, al tiempo que se evalúan los desafíos y las oportunidades asociados a su implementación en esta ciudad de los Andes ecuatorianos. A medida que avanzamos en esta investigación, se torna evidente que el aprovechamiento de la energía solar en Riobamba no solo tiene el potencial de transformar su matriz energética, sino también de contribuir de manera significativa a la construcción de un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

En las páginas posteriores, se examinan los fundamentos teóricos de la energía solar y los paneles fotovoltaicos, así como su adaptación a las condiciones geográficas y climáticas específicas de Riobamba. Además, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los factores económicos, sociales y ambientales que influyen en la adopción de esta tecnología en el contexto local. Finalmente, se presentarán las conclusiones y recomendaciones que surgen de este estudio, con el objetivo de proporcionar a las autoridades, las empresas y la comunidad en general las herramientas necesarias

para tomar decisiones informadas en torno a la implementación de sistemas fotovoltaicos en Riobamba.

1.1 Planteamiento del problema

La generación de energía limpia, a partir de fuentes renovables, como la solar fotovoltaica, en los últimos años ha ganado importancia, debido a su contribución a la sostenibilidad ambiental y al cambio en la matriz energética. La ciudad de Riobamba, ubicada en el centro del Ecuador, posee condiciones físicas y meteorológicas particulares que pueden influir en la eficiencia y rendimiento de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica.

1.2 Situación de la problemática

En la ciudad Riobamba, ubicada en la provincia de Chimborazo – Ecuador, no se han realizado investigaciones al detalle sobre el aprovechamiento de la energía solar como una alternativa para la generación de energía eléctrica, por lo que, existe poco conocimiento sobre las diferentes variables como: la radiación solar, condiciones climáticas y su variación durante ciertos periodos tiempo, así como las propiedades de operación óptimas de los paneles fotovoltaicos, que intervienen en el diseño de un modelo que ajuste dichas propiedades y brinde las condiciones óptimas para la generación de energía solar eficiente en la ciudad.

En este trabajo de investigación se plantea un modelo que contribuye a optimizar el uso de energía solar en Riobamba, para enfrentar la situación actual del mundo, donde la principal fuente de energía es la quema de combustibles fósiles, la principal causa de emisiones de CO₂, contribuye significativamente al calentamiento global. Los avances tecnológicos y el crecimiento de la población han motivado a que los gobiernos consideren un cambio en la matriz energética, considerando varias alternativas y entre ellas la energía solar, que junto a la energía eólica son las abundantes en la naturaleza (Angalaeswari, Subbulekshmi y Deepa 2024, p. 1)

1.3 Formulación del problema

¿Contar con un modelo de energía solar usando paneles fotovoltaicos que las principales condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad, así como las propiedades de operación de los paneles fotovoltaicos, permitirá optimizar el uso de energía eléctrica en la ciudad de Riobamba?

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación teórica

En este trabajo de investigación se revisarán temas relacionados principalmente a la generación de energía sostenible y renovable, específicamente la Energía Solar para la producción de energía eléctrica, manteniendo como prioridad la importancia de mitigar el impacto ambiental debido al agotamiento de los recursos no renovables. Al proporcionar una modelación específica y detallada del aprovechamiento de energía solar en la ciudad de Riobamba, estos resultados pueden ser replicados en otras áreas con características similares e impulsará a los gobiernos a crear políticas locales que fomenten la adopción de la energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos.

1.4.2 Justificación práctica

El uso de energía solar reduce las emisiones de gases efecto invernadero, la implementación de sistemas fotovoltaicos en Riobamba puede contribuir significativamente a la producción de energía sostenible y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovable. Esto puede conducir a beneficios ambientales y económicos, pues es posible fomentar el desarrollo de la industria de energía solar en Riobamba, lo que podría generar empleo y oportunidades económicas, además de impulsar la innovación tecnológica en el área.

1.4.3 Justificación metodológica

Utilizando herramientas de simulación será posible evaluar y diagnosticar disponibilidad de radiación solar en la zona de estudio, lo que es esencial para el diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos, llegando así a proporcionar una metodología con un diseño eficiente de sistemas de paneles fotovoltaicos, considerando las condiciones locales y su variación climática. Dentro de esta misma simulación se evaluarán las condiciones de impacto de instalación y/o uso de los paneles fotovoltaicos en Riobamba, es así, como esta metodología brindará la oportunidad a las autoridades y empresas a tomar decisiones informadas.

1.5 Objetivo general

Establecer un modelo de aprovechamiento de energía solar usando paneles fotovoltaicos en la ciudad

de Riobamba.

1.6 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, así como de los paneles a implementarse.
- Desarrollar un modelo que ajuste las propiedades físicas y meteorológicas de Riobamba en base a los parámetros de operación de los paneles fotovoltaicos.
- Validar los resultados del modelo de ajuste desarrollado implementando un prototipo de generación.

1.7 Hipótesis

El desarrollo de un modelo de generación de energía solar considerando las condiciones físicas y meteorológicas particulares de la ciudad de Riobamba para mejorar el rendimiento de los paneles solares.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Marco referencial

Según Al-Shahri et al. (2021) la producción de energía solar fotovoltaica se ha convertido en la tecnología con el uso de energía renovable de más rápido crecimiento en el mundo, esto gracias al incremento de proyectos e investigaciones sobre el desarrollo y avances tecnológicos del aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, estableciéndose como la solución más prometedora y sostenible para el futuro energético mundial, sin embargo, debido a las condiciones climáticas intermitentes y otros factores, aún existen incertidumbres considerables en la potencia de salida de los paneles fotovoltaicos, por lo que se está trabajando en desarrollar modelos que brinden predicciones más exactas y precisas (Singla, Duhan y Saroha 2022).

Clark, Klein y Beckman (1984) presentan uno de los primeros métodos para predecir el rendimiento promedio a largo plazo de sistemas fotovoltaicos con baterías de almacenamiento y sujetos a cualquier perfil de carga diurna en base a datos estadísticos de radiación y utilizabilidad, que tenía en cuenta la variabilidad de la demanda eléctrica, así como la variabilidad de la radiación solar. Desde ahí se han venido realizando investigaciones y se han publicado trabajos de investigación con métodos de simulación de generación de energía solar fotovoltaica, cuyo principal objetivo es ajustar la curva I – V de un dispositivo solar para diferentes condiciones de irradiancia y temperatura; Piliouguine, Sánchez-Friera y Spagnuolo (2024), mencionan algunos modelos, de los cuales a continuación describen los más comunes:

- Métodos de escala: presenta un conjunto de ecuaciones similares que permiten la corrección directa de la corriente de cortocircuito I_{SC} y la tensión de circuito abierto V_{OC} . desde las condiciones iniciales hasta las condiciones objetivo (Antonio Luque, Hegedus Steve y Wiley John 2011).
- Modelo de un solo diodo y modelo de diodo doble: implementan modelos de circuitos equivalentes de células solares con técnicas de simulación para determinar los parámetros desconocidos del modelo que establecen una relación entre la corriente de salida y voltaje (Chaibi et al. 2018).

Actualmente, en el 2024, se han realizado nuevas investigaciones que han permitido encontrar un modelo basado en la información de las hojas de datos de los paneles fotovoltaicos, cuya información es útil para calcular los parámetros del modelo de doble diodo de módulos fotovoltaicos disponibles comercialmente, (Şentürk 2024) en su investigación presenta dos novedades, primero: calcula analíticamente las corrientes de saturación inversa y en segundo lugar los parámetros del modelo de doble diodo que se calculan mediante un nuevo procedimiento recursivo utilizando parámetros de sintonización, este nuevo método calcula los parámetros del modelo de doble diodo y simula las curvas de corriente-voltaje de módulos fotovoltaicos comerciales en diversas condiciones de funcionamiento con alta precisión.

En el contexto nacional, Ecuador no se queda afuera y ha experimentado un crecimiento significativo en la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica en los últimos años, se han realizado investigaciones en universidades y centros de investigación del país, que han abordado diversos aspectos relacionados con la generación de energía solar, desde la evaluación del potencial solar hasta el diseño y la optimización de sistemas fotovoltaicos. Se inicia realizando estudios de análisis de transferencia de energía entre un sistema híbrido de energía renovable a pequeña escala y la red eléctrica para cubrir algunas demandas de energía (Mikati, Santos y Armenta 2012), hasta llegar a analizar la viabilidad de usar una forma de energía limpia y con un impacto ambiental bajo, es así a realizar estudios e implementaciones en áreas rurales donde la mayoría de veces es difícil su acceso a la red de energía eléctrica convencional por su costo y complejidad (Cuenca et al. 2023). Sin embargo, en el Ecuador aún existen barreras que afectan el avance tecnológico sobre la adopción de la energía solar como la falta de una política energética, regulaciones, financiamiento inadecuado, subsidios a los combustibles y la incertidumbre de los inversionistas (Barragán-Escandón et al. 2022), la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica no señala con claridad al menos normativas, para emprendimientos relacionados con la generación de energía fotovoltaica, para el consumo propio (Muñoz-Vizhñay, Rojas-Moncayo y Barreto-Calle 2018).

En la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles, los sistemas solares fotovoltaicos (PV) se han convertido en una tecnología crucial capaz de aprovechar los recursos renovables para satisfacer la demanda de energía. La precisión de predecir el comportamiento de estos sistemas en diferentes condiciones ambientales es fundamental para optimizar su eficiencia y confiabilidad. Este trabajo de investigación presenta un modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, que incluso permite predecir las salidas de corriente y

voltaje de los paneles fotovoltaicos, específicamente adaptado a las condiciones geográficas y meteorológicas únicas de la ciudad.

2.2 Energía solar

La energía solar es la fuente de energía limpia más antigua que existe y es la base de casi todas las fuentes de energía, tanto renovables como fósiles; en la actualidad, la utilización de equipos especializados ha permitido la difusión necesaria de información sobre la energía solar y otras fuentes de energía renovables (Zekai, 2008, p. 21).

La mayor parte de energía que recibe la Tierra proviene del Sol, de está, una pequeña parte se utiliza para mantener la vida orgánica y exceptuando la acumulación de energía causada por el cambio climático, el resto se dispersa al exterior. Los fenómenos meteorológicos como: el viento, la lluvia, nevada, etc. y la formación de corrientes y almacenamientos de agua como: lagos, ríos, mares, etc. son causados principalmente por la variación de la radiación solar, que se da a lo largo del día y del año es una zona específica; siendo este uno de los motivos principales que convierten a la energía solar, al igual que la energía nuclear y geotérmica en las fuentes de energías renovables más atractivas en la actualidad (Jutglar, 2004).

Sin embargo, es necesario considerar que, durante la noche, no se cuenta con energía solar, por lo que es necesario utilizar en equipo de almacenamiento de energía como las baterías, además en la presencia de nubes este tipo de tecnología no es confiable. Otros factores que se deben considerar es el costo de producción, pues la tecnología solar es costosa, requiere de espacios amplios para recolectar la suficiente energía fotovoltaica (National Geographic 2010).

2.2.1 Radiación solar

El sol emite su energía en forma de radiación electromagnética o luz, se propaga a través del espacio en todas las direcciones mediante ondas electromagnéticas y solo una pequeña cantidad de esa energía llega a la Tierra y por diversos factores como: la distancia entre la Tierra y el Sol, la difusión, reflexión de las nubes y absorción de las moléculas de gases llega muy debilitada, es así que la energía del sol llega a la Tierra en forma de radiación de onda corta y la radiación absorbida por la superficie terrestre es devuelta al espacio en forma de radiación de onda larga. La radiación solar abarca un amplio espectro, conocido también como espectro electromagnético que es una clasificación de las diferentes

formas de radiación electromagnética según su longitud de onda o frecuencia y va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma (IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2024).

Para describir la radiación, se necesita de tres cantidades que se relacionan matemáticamente: la frecuencia (f) que se mide en ciclos por segundo o Hertz, la longitud de onda (λ) que se mide en metros y la energía (E) que se mide en electronvoltios; como se puede observar en la ecuación (1.2) para el cálculo de la energía.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Dónde:

c: velocidad de la luz, que corresponde a $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

f: frecuencia

h: constante de Planck $\approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

En la Figura 1-2 se puede observar que la relación entre la energía de la radiación y la longitud onda es inversamente proporcional, lo que significa que se obtiene menos energía si la longitud de onda es mayor y se obtiene más energía si la longitud de onda es menor; sucede lo mismo con la frecuencia, si ésta es mayor será menor la longitud de onda y viceversa, en física entender estas relaciones ayuda a explicar fenómenos como el efecto fotoeléctrico, donde los electrones son expulsados de un material cuando es irradiado por luz de suficiente energía, fundamentando así la naturaleza cuántica de la luz y la interacción entre materia y radiación (Gobierno de México 2023).

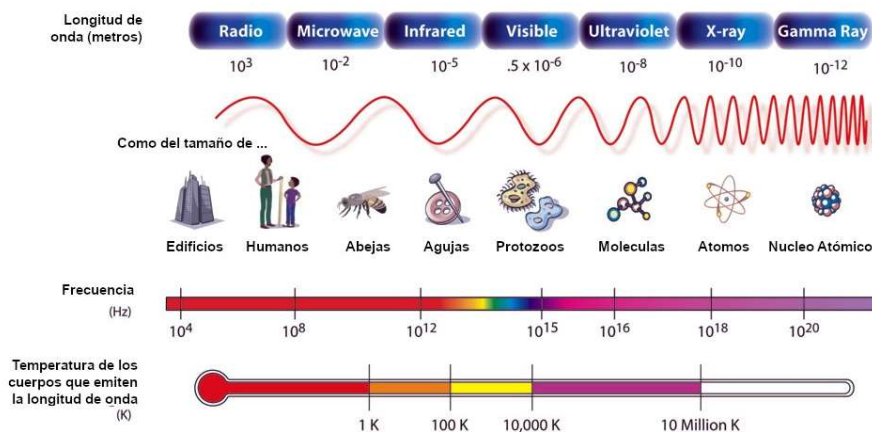


Figura 1-2: Espectro electromagnético

Fuente: (Marte, 2020)

La radiación solar puede ser directa y difusa, esto en función a cómo llega la radiación a la superficie de la Tierra. La radiación Solar Directa: se presenta cuando la radiación viaja en línea recta desde el sol hasta la superficie de la terrestre sin ser dispersada o reflejada significativamente por la atmósfera y la radiación Solar Difusa: es aquella que ha sido dispersada por moléculas de gas y partículas presentes en la atmósfera; y, la suma de la radiación Solar Directa y la radiación Solar Difusa da como resultado lo que se conoce como Radiación Global (U. S. Department of Energy 2002). Existe un tercer tipo de radiación solar, la radiación solar reflejada, que viene a ser aquella radiación que es devuelta por la superficie terrestre y depende del coeficiente de reflexión de la superficie (Carbonell 2023) , como se puede visualizar en la Figura 2-2.

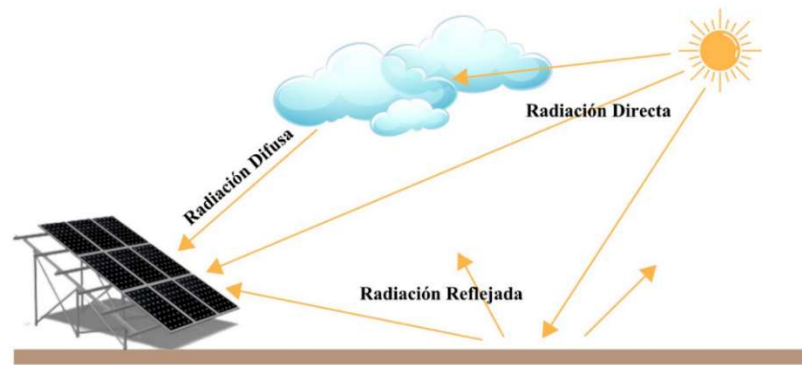


Figura 2-1: Radiación solar

Fuente: (Carbonell 2023)

Alrededor de cuatro millones de exajulios ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) de energía solar llega a la Tierra anualmente, y se afirma que aproximadamente $5 \times 10^4 \text{ EJ}$, son fácilmente cosechables, sin embargo, a pesar de este enorme potencial y del aumento de la concienciación, la contribución de la energía solar al suministro energético mundial sigue siendo insignificante. La energía solar funciona convirtiendo la luz solar en electricidad o calor mediante diversas tecnologías, siendo las más comunes la energía solar fotovoltaica (PV) para la generación de electricidad y los sistemas solares térmicos para calefacción. (Kabir et al. 2018).

De aquí la importancia de conocer la Irradiancia, que es la potencia de la energía solar por unidad de área y viene a ser uno de los datos fundamentales para el desarrollo de este trabajo de investigación que se centrará en la energía solar fotovoltaica, para la generación de electricidad.

2.3 Efecto fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica, se basa en el principio de la conversión de energía: la transformación de la energía luminosa del Sol en electricidad, para que este suceso sea posible, se necesita de un material capaz de absorber la luz solar, para luego transformar esa energía absorbida en energía eléctrica, esta transformación ocurre a través de un proceso conocido como efecto fotovoltaico, que se presenta cuando la luz solar (un fotón) incide sobre la capa límite del material semiconductor de la célula fotovoltaica y altera a los electrones provocando un salto de los mismo entre una capa y otra, lo que permite generar corriente eléctrica (Holmes y Fletcher 2020).

2.3.1 Células fotovoltaicas

En la Figura 3-2 se observa cómo funciona el efecto fotovoltaico en una célula fotovoltaica o celda solar, que no es más que un dispositivo semiconductor, cuyo principio se basa en la capacidad que tienen de los materiales semiconductores para absorber fotones y liberar electrones, y así transformar la radiación solar en electricidad. Como se tiene conocimiento la luz del sol está formada por fotones, que son pequeñas partículas de energía luminosa. Estos fotones, al incidir en una celda solar que consiste en un material semiconductor con una unión p-n, pueden ser absorbidos por el semiconductor; al absorberse, los fotones generan pares de huecos y electrones dentro del material. Si la celda está conectada a un circuito externo, se establece una corriente eléctrica debido a que el voltaje generado empuja los electrones desde el lado n hacia el lado p de la unión, permitiendo el flujo de electricidad a través del circuito (Zhang y Wang, 2019) .

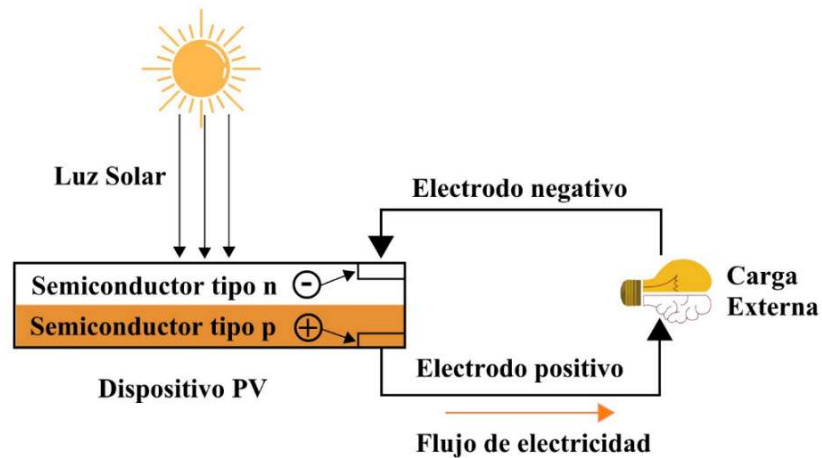


Figura 3-2: Principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica

Fuente: (Zhang y Wang, 2019)

Las células fotovoltaicas se pueden fabricar a partir de varios materiales semiconductores, más comúnmente Silicio (Si): cristalino, policristalino y amorfo; aunque existen también células fotovoltaicas fabricadas de germanio; la selección del material para la célula fotovoltaica se la realiza en función de las características de absorción solar y del costo de fabricación (Luque y Hegedus 2011, p.84) .

2.4 Física de los semiconductores

Los semiconductores son materiales que tienen la capacidad de absorber la luz y entregar una parte de la energía de los fotones absorbidos a los portadores de corriente eléctrica, que forman el par conocido como par electrón - hueco; esta es una propiedad única y se da gracias a la estructura de bandas de energía presentes en los semiconductores. Estas bandas corresponden a una llena de electrones, denominada banda de valencia (nivel de energía más alto que ocupa un electrón en condiciones normales) y otra generalmente vacía, denominada banda de conducción (nivel de energía inmediatamente superior que los electrones pueden ocupar para contribuir a la conducción eléctrica), en cambio, al espacio energético que existe entre estas dos bandas se le conoce como “bandgap”. En los semiconductores el “bandgap” es el responsable del movimiento de los electrones, ya que permite que solo aquellos que hayan ganado la suficiente energía puedan moverse desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, por lo que mientras más grande sea el bandgap, más energía se necesitará para mover un electrón. (Luque y Hegedus 2011, p.82-84)

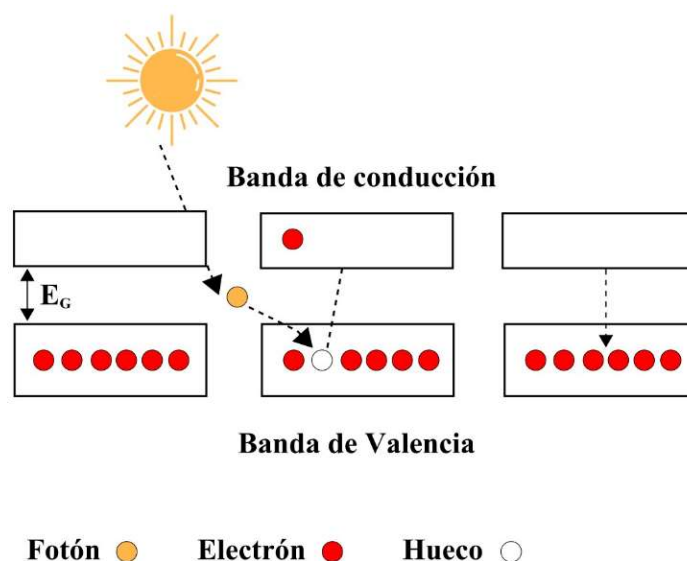


Figura 4-2: Bandas de energía - Par electrón-hueco

Realizado por: Aguirre D., 2024

De acuerdo a la pureza de los semiconductores, estos pueden clasificarse en semiconductores intrínsecos: formados por átomos que logran evitar el movimiento libre de los electrones; ahora considerando que en los semiconductores la conductividad varía en función de la temperatura, por lo que pueden pasar de comportarse como conductores a aislantes, surge la necesidad de controlar la conductividad eléctricamente, este efecto es posible al introducir átomos de otros elementos en el semiconductor, a estos átomos se les llama impurezas y permiten que la conductividad sea controlable, dando lugar a los semiconductores extrínsecos (REPSOL 2023) .

Estas impurezas pueden ser de tipo N o P, por lo que, si existen dos tipos de impurezas, se tendrá también dos tipos de cristales: cristales de impurezas P y cristales de impurezas N.

2.4.1 Cristales de impurezas n y p

Los cristales de impureza n, son cristales pentavalentes con impurezas “donadoras” y la cantidad de electrones es mayor a la cantidad de huecos, entonces a los electrones se los denomina portadores mayoritarios y a los huecos portadores minoritarios. Como el flujo de corriente a través del cristal es a través de electrones libres que son portadores de carga negativa, este tipo de conductividad se denomina conductividad negativa o de tipo n.

Los cristales de impureza p, son trivalentes con impurezas “aceptoras”, en este caso sucede lo contrario, la cantidad de huecos es mayor a la cantidad de electrones, entonces a los huecos se los denomina portadores mayoritarios y a los electrones portadores minoristas (Carmona 2006, p. 515)

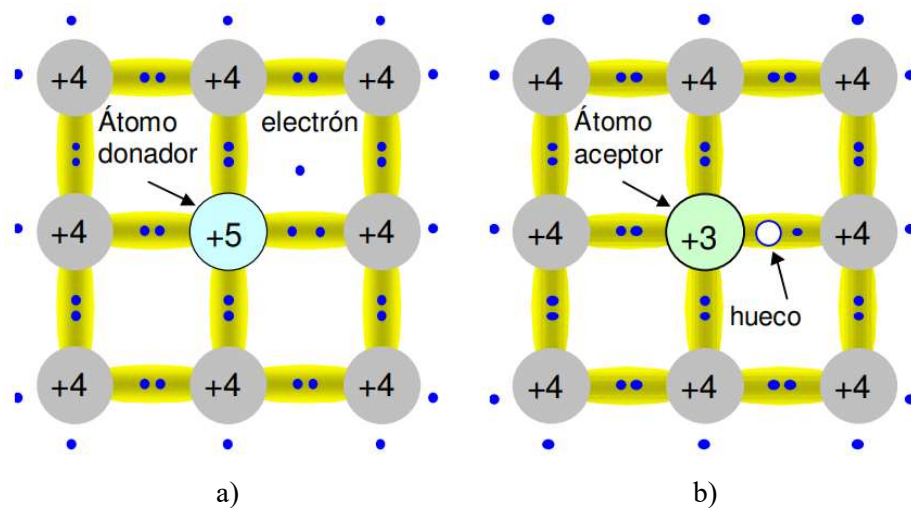


Figura 5-2: Impurezas a) n-donadora b) p-aceptora

Fuente: (Leñero 2022)

2.4.1.1 Propiedades de la unión p-n

En el momento en que se forma una unión p-n, los electrones libres en la región n comienzan a moverse a través de la unión hacia la región p, donde se combinan con los huecos cercanos a la unión, en consecuencia, la región n experimenta la pérdida de electrones libres a medida que se difunden hacia la unión. Esto crea una capa de cargas positivas cerca de la unión, mientras tanto la región p pierde huecos a medida que los electrones se mueven a través de la unión y como resultado, cerca de la unión hay una capa de cargas negativas (iones trivalentes). La región de agotamiento está formada por estas dos capas de cargas, una positiva y otra negativa, el término "agotamiento" se refiere al hecho de que cerca de la unión, la zona de carga (electrones libres y huecos) se agota, es decir, se vacía, debido a la difusión a través de la unión. Es importante destacar que la capa de agotamiento se forma muy rápidamente y es extremadamente delgada en comparación con las regiones n y p (Carmona 2006, p. 515-516).

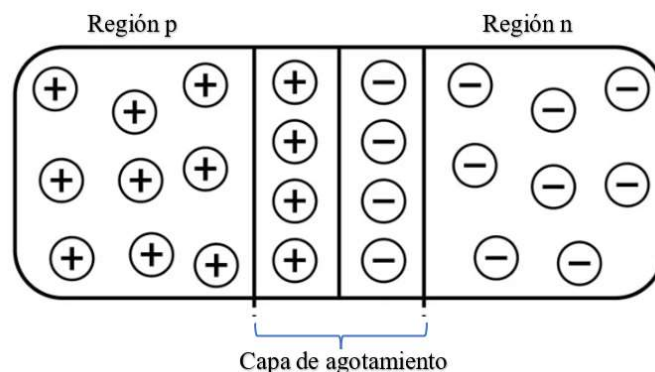


Figura 6-2: Unión p-n

Fuente: (Samudrapon Dam 2023)

Una vez que se forma la unión p-n y se crea la capa de agotamiento, se detiene la difusión de electrones libres. En otras palabras, la región de agotamiento actúa como una barrera para el movimiento adicional de electrones libres a través de la unión, en donde las cargas positivas y negativas crean un campo eléctrico. Existe una diferencia de potencial a través de la capa de agotamiento y se denomina potencial de barrera (V_0). El potencial de barrera de una unión p-n depende de varios factores, incluido el tipo de material semiconductor, la cantidad de dopaje y la temperatura. El potencial de barrera típico es aproximadamente: para el silicio, $V_0 = 0,7$ V; y, para el germanio, $V_0 = 0,3$ V.

2.4.2 Propiedades del Silicio y del Germanio

Como se había mencionado anteriormente, el silicio y el germanio son los materiales más utilizados para la fabricación de los semiconductores, esto gracias a los beneficios que brindan, ya que combinan sus propiedades físicas, químicas y térmicas, con su bajo costo, además que gracias a la estructura de sus bandas de energía permiten un control adecuado de la conductividad eléctrica, sin embargo, entre estos dos materiales el Silicio es el más utilizado por su abundancia en la naturaleza, bajo costo y su compatibilidad con varios procesos de fabricación.

En la siguiente Tabla 1-2, se describen las principales propiedades del germanio y el silicio.

Tabla 1-2: Propiedades físicas y químicas del Germanio y el Silicio

Propiedades	Germanio (Ge)	Silicio (Si)
Número atómico	32	14
Masa atómica (g/mol)	72,6	28,08
Radio atómico (nm)	0,137	0,132
Estructura electrónica	[Ar] 4s ² 3d ¹⁰ 4p ²	[Ne]3s ² 3p ²
Densidad (kg/m ³)	5323	2330
Temperatura de fusión (°C)	937,4°C	1410°C
Calor específico (J/kg °C)	309	677
Concentración atómica (at/m ³)	4,42x10 ²⁸	4,96x10 ²⁸
Concentración intrínseca a 300 K	2,36x10 ¹⁹ m ⁻³	1,5x10 ¹⁶ m ⁻³
Constante A (m ⁻³ K ^{-3/2})	1,91x10 ²¹	4,92x10 ²¹
Anchura banda prohibida a 300 K	0,67 eV	1,12 eV
Movilidad electrones a 300 K	0,39 m ² /Vs	0,135 m ² /Vs
Movilidad huecos a 300 K	0,182 m ² /Vs	0,05 m ² /Vs
Resistividad intrínseca a 300 K	0,47 m	2300 m
Difusividad electrones	10,1x10 ⁻³ m ² /s	3,5x10 ⁻³ m ² /s
Difusividad huecos	4,9x10 ⁻³ m ² /s	1,3x10 ⁻³ m ² /s
Permitividad eléctrica	15,7	12
Masa efectiva electrones	0,5 m ₀	1,1 m ₀
Masa efectiva huecos	0,37 m ₀	0,59 m ₀

Fuente: (Cabrera y Poma 2015)

2.5 Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos (PV) son dispositivos que convierten la luz solar directamente en electricidad, mediante el efecto fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos constan de varias células fotovoltaicas fabricadas de materiales semiconductores, encapsulados en un material duradero y protegidas por una cubierta de vidrio para inhibir los efectos del medio ambiente y son inherentemente dispositivos de corriente continua, para producir corriente alterna, por lo que se deben utilizar junto con un inversor. La mayoría de las células fotovoltaicas están hechas de silicio cristalino. Las células fotovoltaicas producen corriente en proporción al nivel de radiación solar (hasta un determinado voltaje). En la Figura 7-2, se aprecia la relación corriente/voltaje de una celda de silicio típica a un nivel fijo de radiación solar, dado que la potencia es proporcional al producto de la corriente y el voltaje, la potencia de una celda fotovoltaica seguirá aumentando hasta que la corriente comience a disminuir. Debido a que el voltaje máximo de las células fotovoltaicas es inferior a 1V, se conectan varias celdas en serie en un panel fotovoltaico (Manwell 2004).

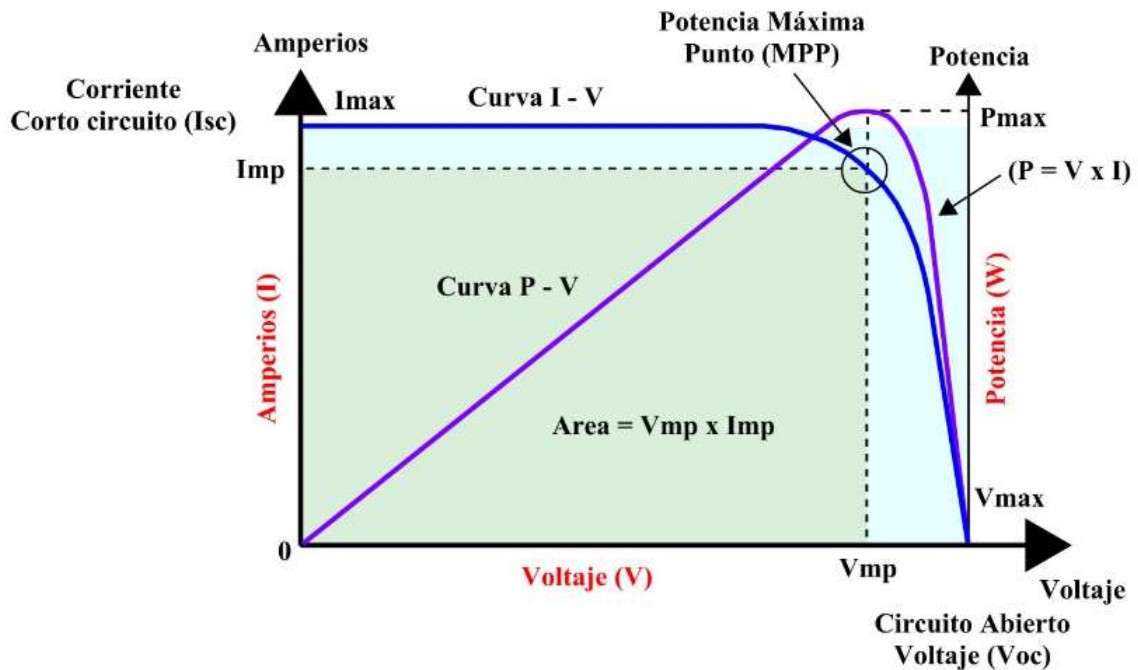


Figura 7-2: Curva característica de un panel fotovoltaico

Fuente: (Manwell 2004)

2.5.1 Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos

Una vez que se han mencionado conceptos básicos sobre energía solar, radiación, efecto fotovoltaico, células fotovoltaicas y semiconductores, se puede explicar de mejor manera el funcionamiento de un panel fotovoltaico, según Nelson (2003):

- 1. Absorción de la luz:** Los paneles solares se componen de muchas células solares individuales, hechas principalmente de silicio. Cuando la luz solar, compuesta de paquetes de energía llamados fotones, incide sobre la superficie de una célula solar, la energía de los fotones es absorbida por el silicio.
- 2. Creación de pares electrón-hueco:** la energía de los fotones absorbidos se transfiere a los electrones en la red de silicio, si esta energía es mayor que la energía de banda prohibida o bandgap del silicio, se pueden soltar electrones, creando así electrones libres y huecos. Dentro del silicio de la célula solar, hay un campo eléctrico que se genera debido a una unión entre dos tipos de silicio: el tipo n, que tiene electrones adicionales, y el tipo p, que tiene huecos adicionales. Este campo hace que los electrones libres se muevan hacia la capa de tipo n y los huecos hacia la capa de tipo p, impidiendo la recombinación.
- 3. Generación de corriente eléctrica:** el movimiento de electrones hacia el lado tipo n y de los huecos hacia el lado tipo p establece una corriente. Este flujo de electrones es dirigido por el campo eléctrico en la unión p-n y puede aprovecharse colocando contactos metálicos en la parte superior e inferior de la celda fotovoltaica. El movimiento de los portadores de carga (electrones y huecos) también crea una diferencia en la energía potencial eléctrica o voltaje. Cuando el circuito se cierra, por ejemplo, al conectar una carga a la célula solar, los electrones fluyen a través del circuito externo, realizando un trabajo (como encender una bombilla), antes de regresar a la capa tipo p para recombinarse con los agujeros.
- 4. Potencia de salida:** El producto de la corriente eléctrica (I) y el voltaje (V) determinan la potencia de salida de la célula solar, para aumentar la producción de energía, las células solares se conectan en serie y en paralelo dentro de un panel para producir voltajes y corrientes más altos, respectivamente.

5. **Generación neta de energía:** la energía generada por el panel solar debe ser regulada por un controlador de carga y, a menudo, se utiliza un inversor para convertir la electricidad de corriente continua (CC) en electricidad de corriente alterna (CA), que se utiliza en hogares y empresas.

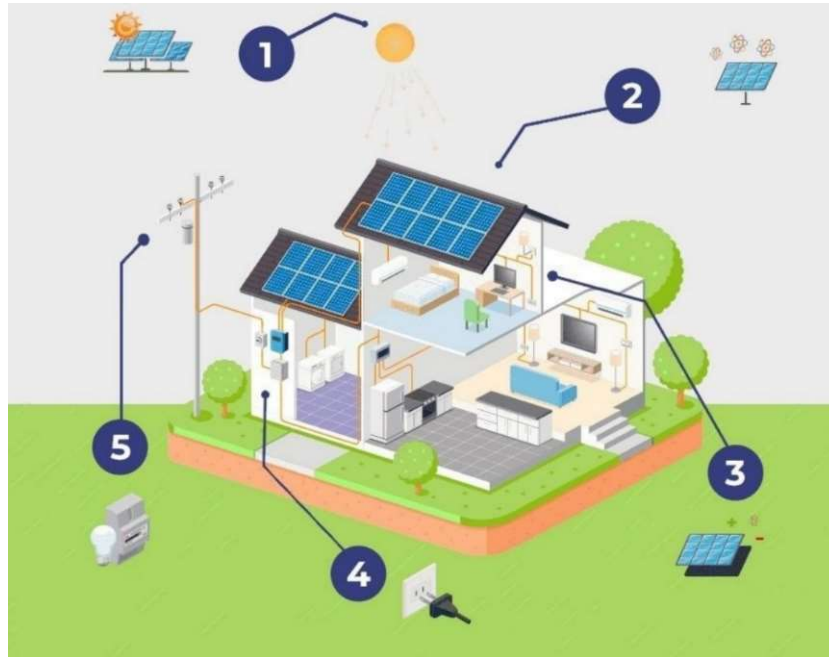


Figura 8-2: Funcionamiento de un panel solar fotovoltaico

Fuente: (Solar Inc 2021)

Los sistemas de energía solar, como los paneles fotovoltaicos, son principalmente sistemas eléctricos, por lo tanto, es importante entender tres conceptos básicos y cómo se relacionan.

2.5.1.1 Corriente (I), Voltaje (V), Resistencia (R) y Potencia (P)

La corriente es la cantidad de electrones que fluyen a través de un cable (conductor), en el Sistema Internacional de Unidades se mide en Amperios (A). Existen dos tipos principales: la Corriente Continua (DC): fluye a través del conductor en una sola dirección, es proporcionada generalmente por paneles solares, baterías, etc., y la Corriente Alterna (AC): en este tipo de corriente la dirección del flujo de carga se invierte periódicamente, la CA es la forma de corriente eléctrica que las empresas de servicios públicos suministran a hogares y empresas, ya que puede transformarse fácilmente a diferentes voltajes y transportarse a largas distancias con una pérdida mínima (Acha 2017).

El flujo de corriente eléctrica es impulsado por una diferencia de potencial llamado Voltaje, a través del conductor y es resistido por el material del conductor, una propiedad conocida como Resistencia

eléctrica, medida en ohmios (Ω). La relación entre corriente, voltaje y resistencia se describe mediante la ley de Ohm (Acha 2017); mientras que la multiplicación entre el voltaje y la corriente da como resultado la potencia, que puede medir los vatios que se consumen en una hora.

2.5.1.2 Ley de Ohm

La ley de Ohm establece que la corriente a través de un conductor entre dos puntos es directamente proporcional al voltaje a través de los dos puntos e inversamente proporcional a la resistencia entre ellos.

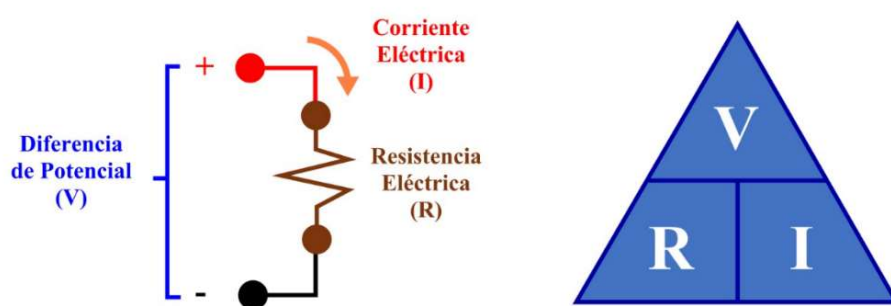


Figura 9-2: Ley de Ohm

Realizado por: Aguirre D., 2024

Tabla 2-1: Resumen de la Ley de Ohm

Concepto	Unidad de medida	Símbolo	Definición
Diferencia de potencial - V	Voltios	[V]	Impulso que necesita una carga eléctrica para fluir con un conductor eléctrico
Corriente eléctrica - I	Amperios	[A]	Flujo de carga que circula en un material por unidad de tiempo
Resistencia eléctrica - R	Ohm	[Ω]	Propiedad que posee un material para oponerse al paso de electrones

Realizado por: Aguirre D., 2024

2.5.2 Principales tipos de paneles fotovoltaicos

A continuación, se detallan los principales tipos de paneles fotovoltaicos:

- **Monocristalino:** son conocidos por su alta eficiencia y durabilidad. Están hechos de silicio monocristalino, lo que permite que los electrones fluyan más libremente en comparación con otros tipos de paneles solares y esto aumenta su eficiencia que puede ir desde el 15% y en algunas ocasiones dependiendo del fabricante llegan al 21%; con una degradación anual de 0.3% a 0.5 %. Son ligeramente más caros debido a su proceso de fabricación y se identifican por su forma circular u octogonal.
- **Policristalino:** se fabrican a partir de la fusión de múltiples cristales de silicio, estos paneles tienen una eficiencia menor y cuestan menos que los paneles de silicio monocristalino. Tienen una apariencia azul distintiva, algo moteada, debido a la forma en que la luz interactúa con la estructura cristalina, la eficiencia de estos paneles ha ido mejorado con el tiempo y va desde el 13% al 16%, con una degradación anual de 0.5% a 0.7% anual, reduciendo así la brecha con sus homólogos monocristalinos.
- **Película delgada:** en este tipo de paneles se incluyen varios materiales diferentes, como el silicio amorfo, el telurio de cadmio y el seleniuro de cobre, indio y galio. Los paneles de película fina se fabrican depositando una o más capas finas de material fotovoltaico sobre un sustrato, son livianos, flexibles y pueden producirse a un costo menor en comparación con los paneles a base de silicio, sin embargo, generalmente ofrecen menor eficiencia que llega hasta el 12%, con degradación anual del 1% y tienen una vida útil más corta. Su aplicación es versátil, apta para situaciones donde los paneles tradicionales no son viables.
- **Células solares de perovskita:** representan una tecnología de vanguardia en el campo de la energía fotovoltaica, llevan el nombre del mineral con una estructura cristalina similar “perovskita”. Ofrecen una buena combinación entre una alta eficiencia teórica que va del 10% al 28%, con una degradación variable y bajo costo de producción. Sin embargo, la longevidad y el impacto ambiental de estas células son actualmente objeto de intensa investigación y desarrollo.
- **Paneles solares bifaciales:** estos paneles pueden capturar la luz solar tanto desde el frente como desde atrás, lo que los hace más eficientes que los paneles solares tradicionales de una sola cara. Son particularmente útiles en instalaciones donde la luz puede reflejarse desde el suelo o las superficies circundantes hacia la parte posterior de los paneles (Hahn 2023).

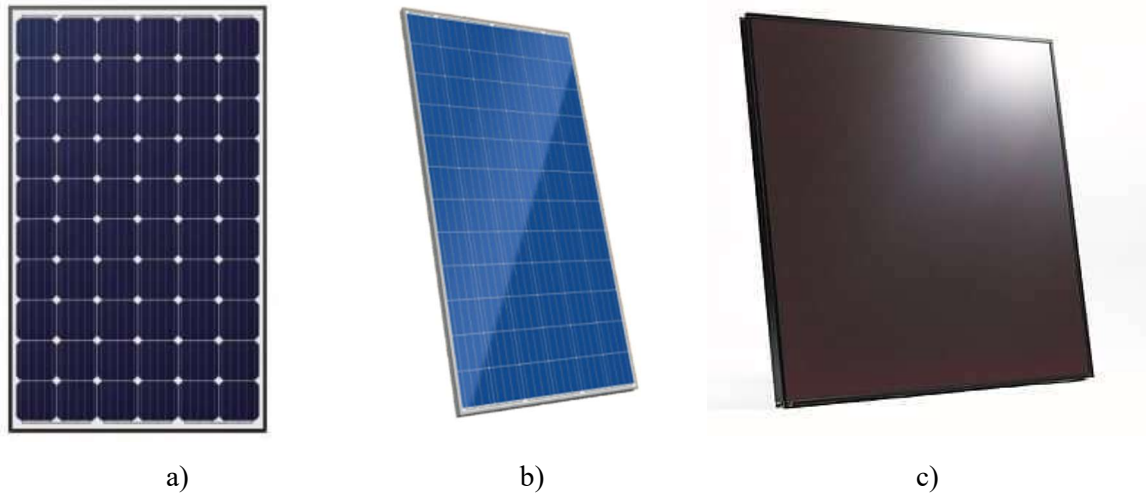


Figura 10-2: Tipos de paneles fotovoltaicos: a) Monocristalino b) Policristalino c) Película fina

Fuente: (Cordero 2024)

Además, los rangos de potencia en los paneles fotovoltaicos pueden variar según el número de células, derivándose de aquí su aplicabilidad, como se puede observar en la Tabla 3-2, en donde se menciona también el término “media célula”, que hace referencia a células fotovoltaicas divididas en la mitad, cuya ventaja es mejorar el comportamiento en la sombra, pero, duplican las soldaduras y contactos lo que pueden generar un fallo y el término “Shingle cells” que hace referencia a un tipo de panel de última tecnología en donde las células fotovoltaicas están cortadas y unidas en teja, con la finalidad de obtener una “super célula”.

Tabla 3-2: Rango de potencia de los paneles fotovoltaicos en función al número de células

Número de células	Rango de potencia	Tamaño (m)	Aplicaciones
60 o 120 (media célula)	280 – 330 W	1.7 x 1.0	Viviendas e industrias
72 o 144 (media célula)	330 – 420 W	2.0 x 1.0	Industria, huertos solares y viviendas
36 o 72 (media célula)	80 – 190 W	1.6 x 0.9	Aplicaciones aisladas de red
Shingle cells	330 – 420 W	(1.7 x 1.0) / (2.0 x 1.0)	Viviendas e industria

Fuente: (Cordero 2024)

Realizado por: Aguirre D., 2024

2.6 Identificación de variables

- **Variable independiente:** Características físicas del panel fotovoltaico, Características físicas y meteorológicas de la atmósfera en la zona.
- **Variable dependiente:** Estimación de la producción de energía.

2.7 Operacionalización de variables

2.7.1 Operacionalización de variables independientes

Tabla 4-2: Operacionalización de las variables independientes

Variable independiente	Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Definición de los indicadores	Criterio de medición	Técnica	Instrumento	Escala
Características Físicas de los paneles fotovoltaicos	Conjunto de propiedades que determinan el rendimiento y aplicabilidad de los materiales (Worldscientific 2018, p. 9)	Potencia Nominal	Watts pico	Cantidad de energía que el panel puede generar en condiciones ideales de radiación solar	Wp	Referencia técnica (Fabricante)	No aplica	Nominal
		Eficiencia	Porcentaje	Indica cuánta luz solar incidente puede convertirse en electricidad	%	Fórmula empírica	Software	Nominal
		Temperatura de funcionamiento	Grados	Temperatura a la que operan los paneles solares durante su funcionamiento normal	°C	Referencia Técnica (Fabricante)	No aplica	Nominal
Características físicas y meteorológicas de la atmósfera en la zona	Conjunto de propiedades y comportamiento de la capa gaseosa que cubre la Tierra (Zúñiga y Crespo 2021, p. 4)	Presión Atmosférica	Fuerza por unidad de área	Fuerza ejercida por la columna de aire que se encuentra sobre un punto específico en la superficie de la Tierra	Pa	Registro de datos	Manómetro	Intervalo
		Radiación solar	Watt por unidad de área	Energía que emite el sol	W/m ²	Registro de datos estación meteorológica	Piranómetro	Nominal
		Temperatura	Grados	Variación de la temperatura con la altitud	°C	Medición directa	Termómetro	Nominal

Realizado por: Aguirre D., 2024

2.7.2 Operacionalización de las variables dependientes

Tabla 5-2: Operacionalización de la variable dependiente

Variable dependiente	Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Definición de los indicadores	Criterio de medición	Técnica	Instrumento	Escala
Estimación de la producción de energía eléctrica	Predicción o cálculo de la cantidad de electricidad que se generará.	Reducción de dependencia de combustibles fósiles	Producción estimada de energía	Energía generada por el panel	kW/h	Fórmula empírica	Software	Nominal

Realizado por: Aguirre D., 2024

2.8 Matriz de consistencia

Tabla 6-2: Matriz de consistencia

Formulación del problema	Objetivo general	Hipótesis	Variables		Indicadores	Técnicas	Instrumentos
¿Contar con un modelo de simulación de generación de energía solar fotovoltaica considerando las características físicas y meteorológicas de la ciudad, así como las propiedades de operación de los paneles fotovoltaicos, permitirá optimizar la generación de energía eléctrica?	Establecer un modelo de aprovechamiento de energía solar usando paneles fotovoltaicos en la ciudad de Riobamba.	El desarrollo de un modelo de generación de energía solar considerando las condiciones físicas y meteorológicas particulares de la ciudad de Riobamba mejorará el rendimiento de los paneles solares.	Independientes	Características Físicas de los paneles fotovoltaicos	Watts pico	Referencia Técnica (Fabricante)	Software
					Porcentaje	Fórmula empírica	Software
					Grados	Referencia Técnica (Fabricante)	Software
				Características físicas y meteorológicas de la atmósfera en la zona	Fuerza por unidad de área	Registro de datos	Manómetro
					Watt por unidad de área	Registro de datos estación meteorológica	Piranómetro
					Grados	Medición directa	Termómetro
			Dependientes	Estimación de la producción de energía eléctrica	Producción estimada de energía	Fórmula empírica	Software

Realizado por: Aguirre D., 2024

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación para este caso de estudio, corresponde a una investigación aplicada, ya que tiene como objetivo optimizar la generación de energía solar fotovoltaica en Riobamba, considerando sus particulares condiciones físicas y meteorológicas, es decir, se realizará una investigación que busque proporcionar soluciones a problemas del mundo real, esto implica la aplicación teorías y conocimientos para abordar cuestiones prácticas que a menudo dan como resultado el desarrollo de nuevas tecnologías, procesos o productos que pueden implementarse directamente en el campo.

En la investigación aplicada la pregunta es: "cómo" podemos resolver un problema particular utilizando el conocimiento adquirido en la investigación básica, en donde la pregunta es por qué sucede algo. Además, esta investigación tiene un componente experimental, dado que implica la recolección de datos meteorológicos y el funcionamiento de los fotovoltaicos.

3.2 Método de investigación

La metodología de la investigación se basa netamente en una combinación de un modelo teórico con una validación experimental y una simulación computacional, dando como resultado un enfoque integrado que permite la comprensión integral de los fenómenos físicos y el desarrollo de soluciones prácticas o nuevas tecnologías.

3.3 Enfoque de la investigación

Dada la naturaleza de las ciencias físicas, que a menudo implican mediciones, modelos matemáticos y análisis estadístico; y, específicamente en este tema de investigación, en donde es necesario explorar y comprender los fenómenos físicos, se ha considerado que el enfoque de investigación más adecuado sería el cuantitativo, por su naturaleza objetiva que se centra en recopilar y analizar datos numéricos para identificar patrones, probar hipótesis y hacer predicciones sobre estos fenómenos físicos.

3.4 Alcance de la investigación

Esta investigación busca conectar la tecnología fotovoltaica y el contexto físico - meteorológico único de la ciudad Riobamba, proporcionando conocimientos prácticos para la optimización de la producción de energía solar en el área. Se pretende no sólo mejorar la eficiencia de las fuentes de energía renovables en la ciudad, sino también contribuir al campo más amplio de soluciones energéticas sostenibles adaptadas a condiciones locales específicas.

3.5 Técnica de recolección de datos

En cuanto a la técnica de recolección de datos, se ha considerado necesario combinar varias técnicas para contar con información efectiva y precisa; entre las técnicas más relevantes se tiene:

- **Análisis histórico de datos:** es decir, previo a la recolección de datos nuevos, se parte del análisis de la información ya existente relacionada con la energía solar fotovoltaica y las condiciones físicas y meteorológicas específicas de Riobamba, como: datos climáticos históricos y estudios previos sobre energía solar en la región.
- **Mediciones Directas:** para obtener datos específicos sobre la generación de energía solar fotovoltaica bajo las condiciones particulares de la ciudad de Riobamba, es esencial realizar mediciones directas, esto incluye el monitoreo de algunas variables como: la irradiación solar, temperatura, velocidad del viento y otros factores meteorológicos críticos que podrían afectar el rendimiento de los paneles solares. Para la toma de las mediciones directas, se contará la información proporcionada por la Estación Meteorológica ubicada en la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- **Simulaciones:** Con los datos recolectados sobre las condiciones físicas y meteorológicas, se procede a realizar el modelo computacional para simular el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en Riobamba, lo que ayudará a predecir la generación de energía bajo diferentes configuraciones y tecnologías de paneles solares, así como a optimizar el diseño de los sistemas para maximizar su eficiencia en el contexto local.

Al combinar estas técnicas se espera diseñar modelos energéticos más precisos y eficientes para la localidad.

3.6 Tratamiento de los datos

El tratamiento de los datos para el desarrollo de la investigación sobre el modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas específicas, como en la ciudad de Riobamba, incluye varios pasos importantes que van desde la recolección hasta el análisis y la interpretación de los datos.

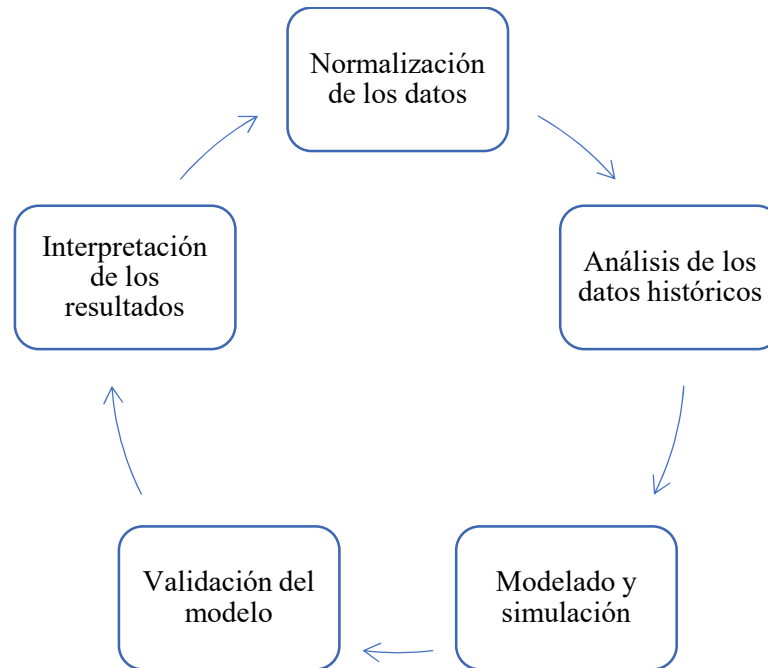


Figura 1-3: Tratamiento de los datos para la investigación

Realizado por: Aguirre D., 2024

3.7 Condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba

La ciudad de Riobamba cuenta con una ubicación privilegiada, ubicada en el centro del Ecuador, en la provincia de Chimborazo, ofreciendo un gran potencial en energías renovables, en particular la energía solar fotovoltaica, por su cercanía al ecuador y características únicas de su entorno.

En la Figura 2-3, se puede observar a detalle la ubicación geográfica de la zona en estudio, la ciudad de Riobamba.

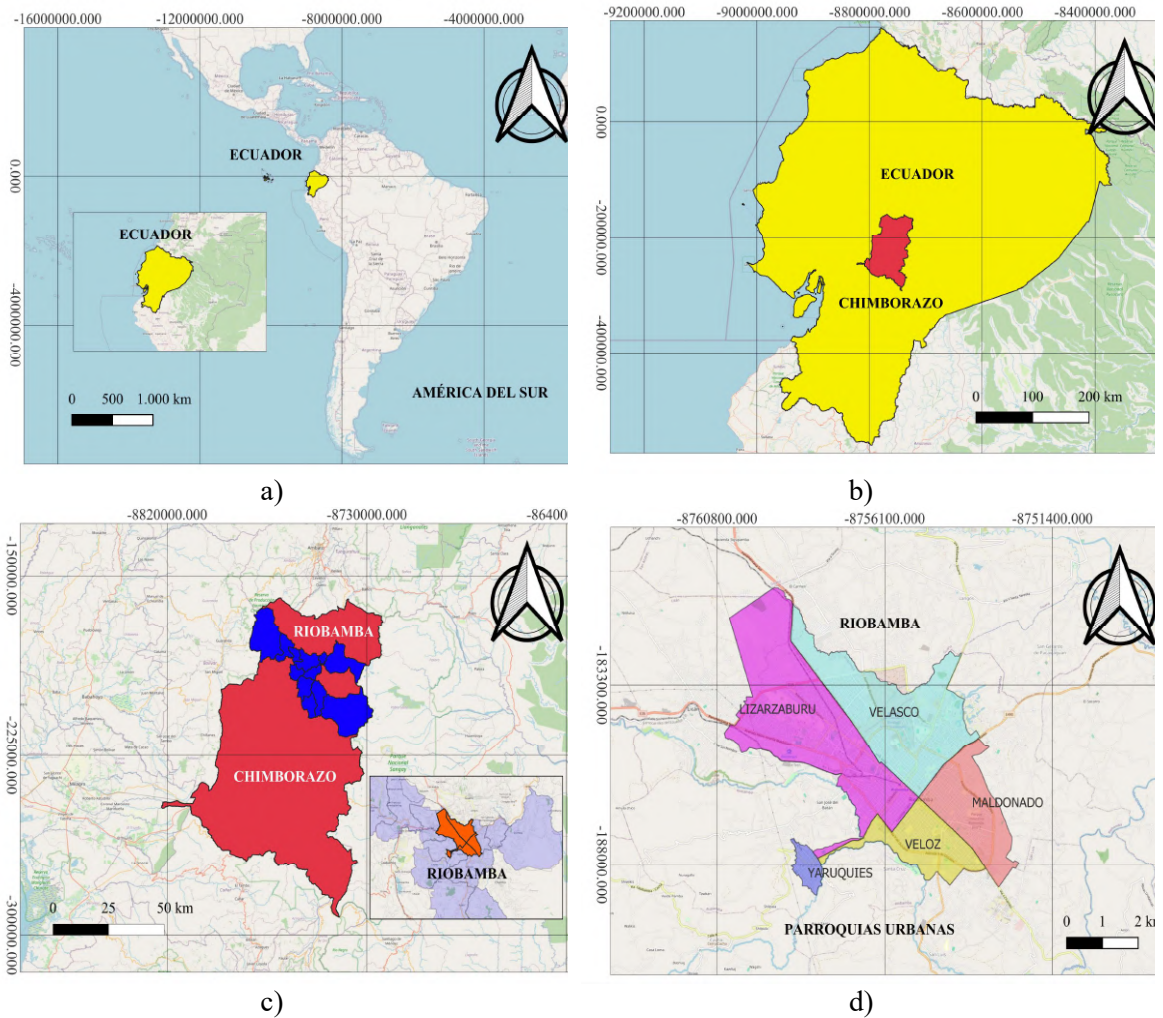


Figura 2-3: Ubicación geográfica de la ciudad de Riobamba. a) América Latina b) Ecuador c) Chimborazo d) Riobamba

Realizado por: Aguirre D., 2024

En la Tabla 1-3, se presenta un resumen de las condiciones físicas y meteorológicas prevalcientes en Riobamba, en donde se puede identificar con facilidad que Riobamba experimenta una variedad de fenómenos climáticos que son fundamentales para comprender el potencial de energía solar de la región. Estos parámetros no sólo definen el contexto físico y meteorológico de Riobamba, sino que también sirven como insumos críticos para evaluar y optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico contribuyendo así al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles adaptadas a sus características climáticas y geográficas específicas".

Tabla 1-3: Condiciones físicas y meteorológicas de Riobamba

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Latitud	1° 41' 46'' al Sur
Longitud	0° 3' 36'' al Occidente
Altura sobre el nivel del mar	2754 m.s.n.m
Geomorfología	Cuenta con un relieve caracterizado por 14 unidades geomorfológicas, predominando el relieve montañoso, que corresponde al 21% (213,07 km ²) de la superficie total.
Clima	Templado Frío con el 21% de la superficie del cantón, focalizándose al noroeste, con una altura que varía desde los 2300 m.s.n.m hasta 3000 m.s.n.m
	Semifrío Frío con el 32% de la superficie del cantón, con una altura que varía desde los 3000 m.s.n.m hasta 3500 m.s.n.m
	Frío moderado con el 47% de la superficie del cantón, con alturas mayores a los 3500 m.s.n.m
Temperatura	Temperatura máxima anual 24,1 °C
	Temperatura media anual 13,6 °C
	Temperatura mínima 12,3°C
Humedad	71,56% de humedad relativa anual
Precipitación	Durante los últimos años se ha registrado durante los meses de abril con 78 mm H ₂ O y noviembre con 83,4 mm H ₂ O, y durante los meses de julio y agosto se ha registrado menor presencia de precipitaciones con 2,8 mm H ₂ O y 3,4 mmH ₂ O respectivamente. Lo que corresponde a un promedio anual de 40,94 mm H ₂ O.
Heliofanía	Corresponde a la medida de horas de sol durante el día. Se hace referencia en función de la captación y presencia del sol cuantificados durante un lapso, registrando en los meses de julio 187,9 horas de sol; octubre 184,1 horas de sol, lo que corresponde a los días con mayor presencia de sol y a los meses con menor presencia de Heliofanía fueron abril 12,5 horas de sol y noviembre 129,8 horas de sol. Dando como resultado una media total de 158,7 horas sol por año.

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Presión Atmosférica máxima	Se presenta una presión atmosférica promedio durante el año de 546,2 mm de Hg.
Viento	La velocidad del viento promedio anual en dirección sur- este del cantón es de 2,2 m/s.

Fuente: (GADM - Riobamba 2020)

Realizado por: Aguirre D., 2024

Cómo se mencionó, para la medición directa de los datos se utilizará la información proporcionada por la Estación Meteorológica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en la parroquia Lizarzaburu del cantón Riobamba.

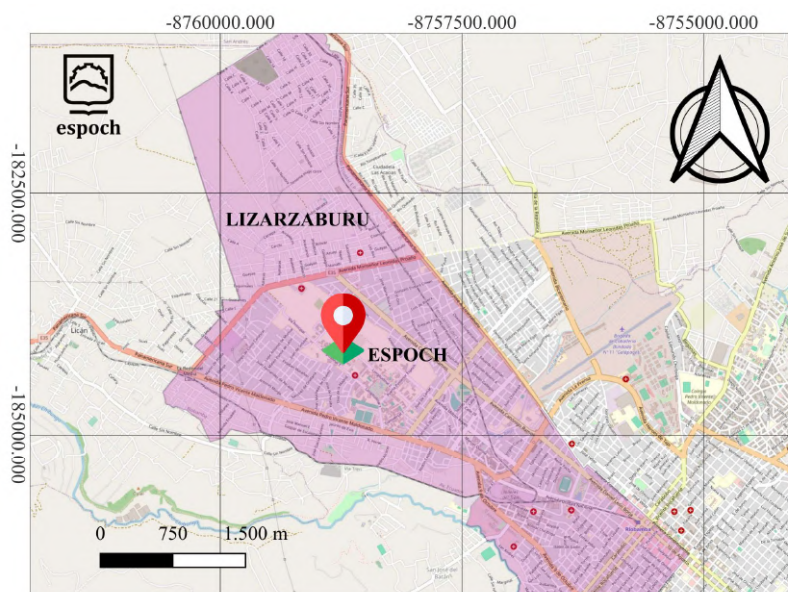


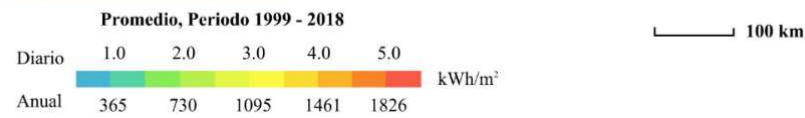
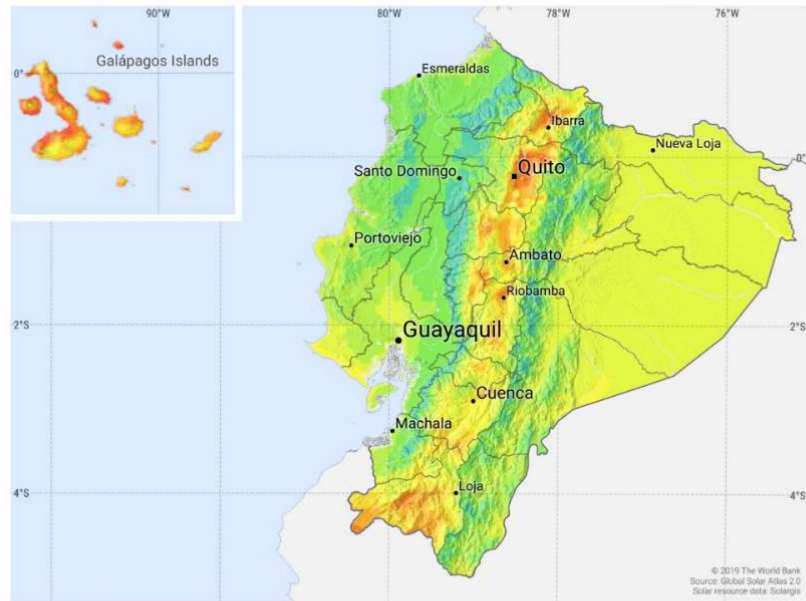
Figura 3-1: Ubicación de la Estación Meteorológica - ESPOCH

Realizado por: Aguirre D., 2024

3.7.1 Radiación solar y potencial de energía fotovoltaica

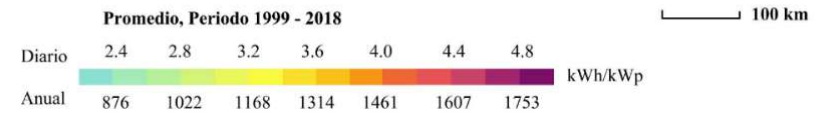
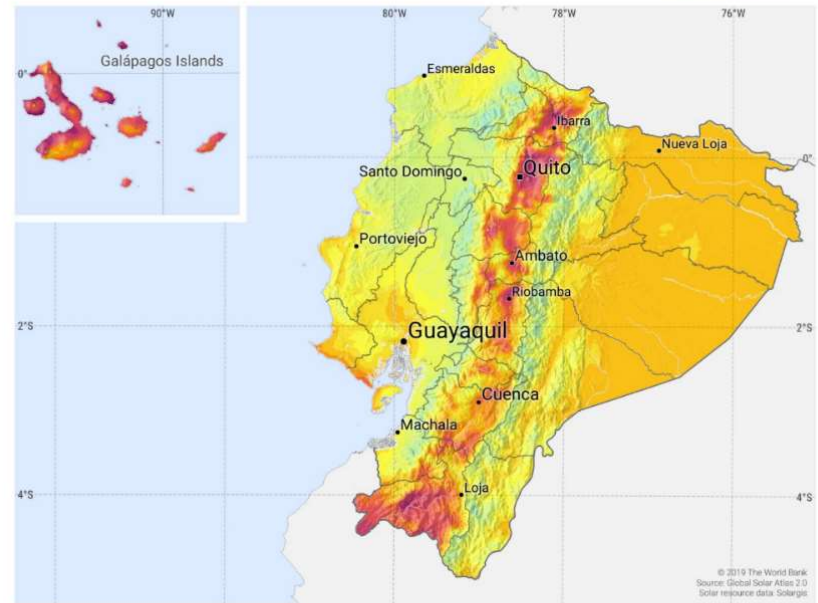
Como el principal objetivo de esta investigación es: establecer un modelo de aprovechamiento de energía solar usando paneles fotovoltaicos en la ciudad de Riobamba, en las Figura 4-3, se puede apreciar la disponibilidad del recurso solar para la generación de energía fotovoltaica durante 20 años, desde 1990 hasta 2018, en un promedio diario y anual; al igual que el potencial estimado de generación de energía solar fotovoltaica.

**MAPA DE RECURSO SOLAR
IRRADIANCIA NORMAL DIRECTA
ECUADOR**



a)

**MAPA DE RECURSO SOLAR
POTENCIAL DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA
ECUADOR**



b)

Figura 4-3: Mapa de recurso solar: a) Irradiancia normal directa b) Potencial de energía fotovoltaica

Fuente: (Solargis 2024)

Realizado por: Aguirre D., 2024

3.8 Análisis de los datos de la Estación Meteorológica

3.8.1 Preparación de los datos

3.8.1.1 Conversión de datos horarios de UTC a la hora local en Ecuador para análisis de los datos meteorológicos

Contar con una precisión en la correlación temporal, entre los datos meteorológicos y los fenómenos físicos observados durante un periodo de tiempo es fundamental, por lo que es necesario realizar una normalización de datos para que cumplan características comunes. Los datos que proporciona la Estación Meteorológica se presentan en Tiempo Universal Coordinado, más conocido como UTC, que se define como una escala de tiempo internacional según la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT (2023), por lo que es necesario convertir estos datos a la hora local de Ecuador, que está cinco horas por detrás del estándar de Hora Universal Coordinada, escrita como un desplazamiento de UTC - 5:00, (World Time Server 2024)

3.8.1.2 Flujoograma para la preparación de los datos de la estación meteorológica.

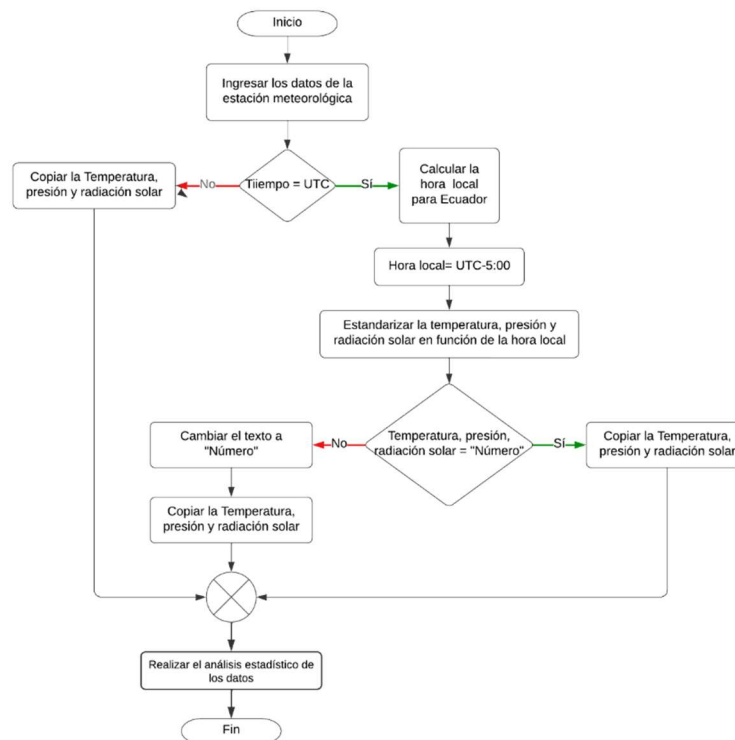


Gráfico 1-3: Procedimiento para la estandarización de datos de la estación meteorológica

Realizado por: Aguirre D., 2024

3.8.2 Análisis estadístico de los datos

Los datos meteorológicos que serán analizados han sido recolectados por la estación meteorológica desde el año 2015 hasta el 2023, cada hora en UTC, por lo que anteriormente fue necesario realizar la estandarización de los datos a la hora local (UTC-5:00), para relacionar de manera correcta el tiempo con las propiedades medidas, que para este caso de estudio serán principalmente la temperatura ambiente y la radiación. Para cada año se ha obtenido la temperatura, radiación y presión atmosférica promedio mensual, se han determinado los valores máximos y mínimos para la temperatura y radiación, y el promedio anual total de dichas propiedades, lo que permitirá realizar al final un análisis del histórico de los datos recolectados en promedio anuales.

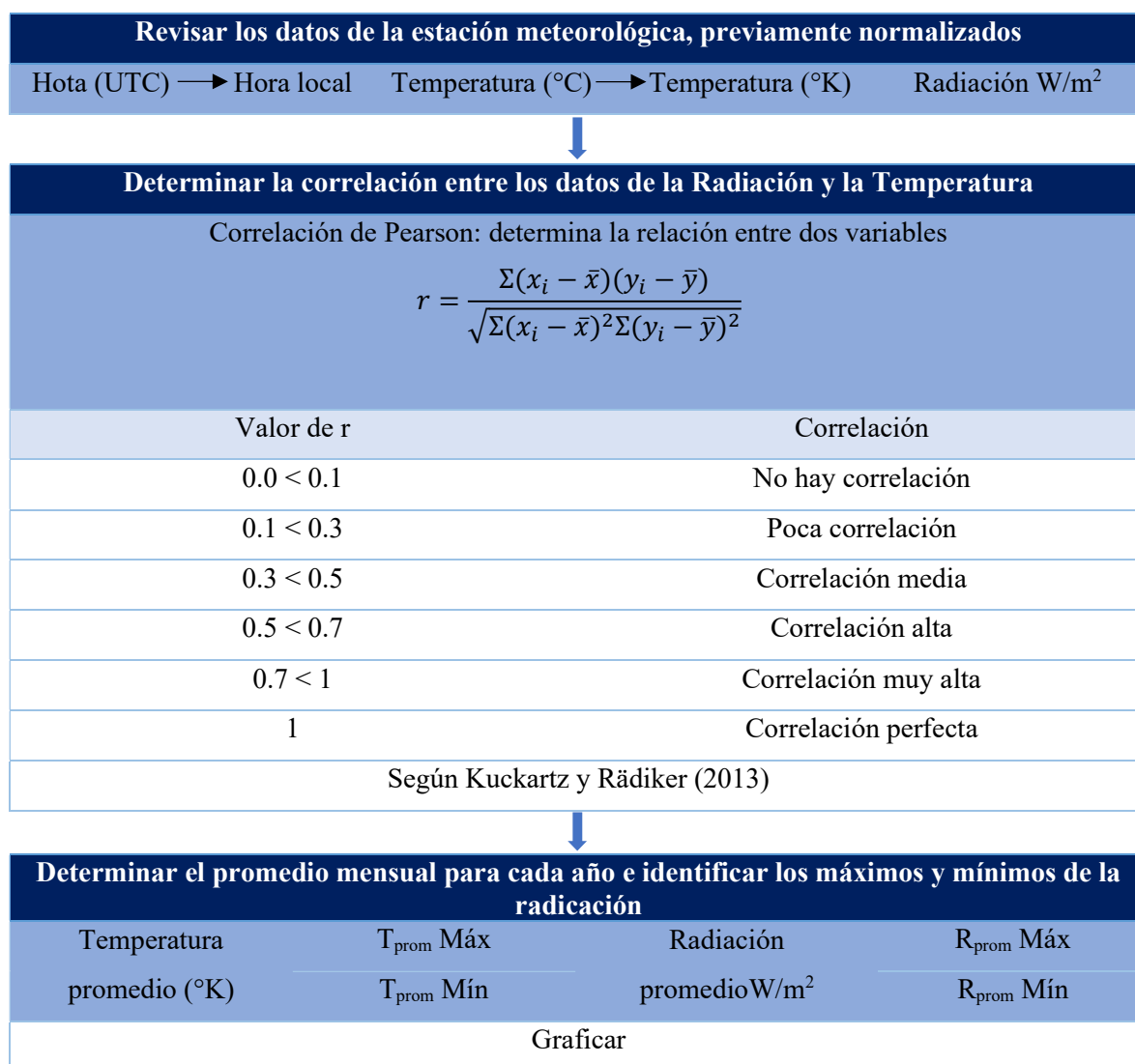


Gráfico 2-3: Metodología para el análisis estadístico de los datos

Realizado por: Aguirre D., 2024

3.9 Descripción del modelo

El modelo más común utilizado para predecir la producción de energía en las células fotovoltaicas es el modelo de circuito agrupado de un solo diodo, el mismo que se rige bajo las Leyes de corrientes y voltajes de Kirchhoff y la ecuación de la unión p-n del diodo que sigue la física de los semiconductores.

3.9.1 Ecuación del diodo no-ideal, unión p-n.

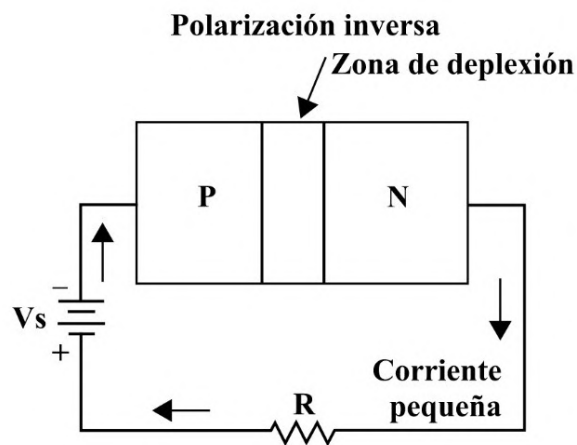


Figura 5-3: Circuito equivalente unión p-n

Realizado por: Aguirre D., 2024

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (1.3)$$

Dónde:

I_D : Corriente neta que fluye a través del diodo (A);

I_0 : "Corriente de saturación", densidad de corriente de fuga del diodo en ausencia de luz (A);

V_T : voltaje térmico del diodo, depende de la temperatura (V);

q : carga del electrón ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ C);

k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K)

T : temperatura absoluta (K); y,

n : factor de idealidad del diodo, varía entre 1 y 2, normalmente aumenta a medida que disminuye la corriente.

3.9.2 Circuito equivalente del panel fotovoltaico

Para determinar el circuito equivalente del panel fotovoltaico, es necesario considerar la corriente de saturación del diodo y una resistencia en serie, según la ecuación (1.3) conocida como la ecuación de Shockley, esto permite determinar un modelo general para los paneles fotovoltaicos, ya que brinda una muy buena aproximación de la corriente de salida, que a su vez permite graficar las curvas I-V y P-V características del panel, las mismas que representan todas las combinaciones posibles de voltaje y corriente de operación, que pueden variar según las condiciones ambientales y físicas del panel (Vargas y Abrahamse Augusta 2014).

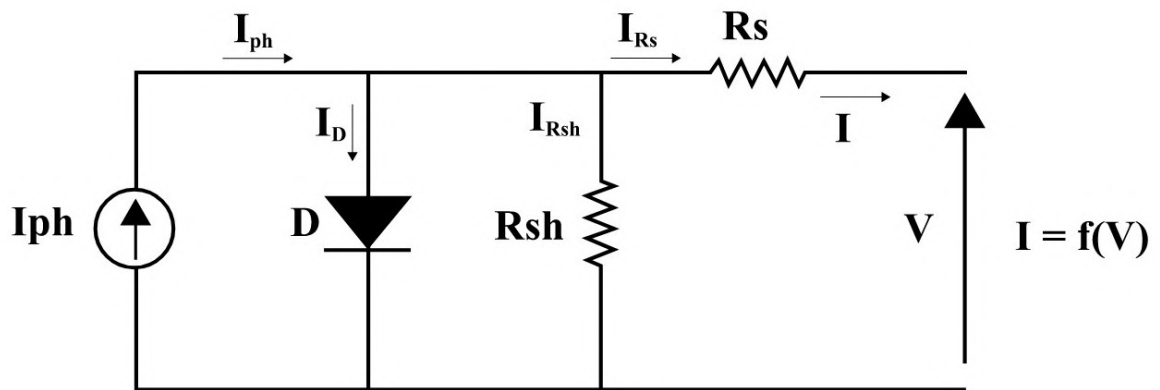


Figura 6-3: Circuito equivalente de una celda solar

Realizado por: Aguirre D., 2024

Por el método de análisis de corrientes y de voltajes de Kirchhoff:

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I_{RS} \quad (2.3)$$

Dónde:

I_{ph} : Corriente fotogenerada (A);

I_{Rsh} : Resistencia en paralelo o Shunt (Ω);

I_{RS} : Resistencia en serie (Ω)

Cómo:

$$I = I_{RS} \quad (3.3)$$

Reemplazamos la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2), y se obtiene la corriente de salida de la celda solar:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_s} \quad (4.3)$$

En donde la corriente del diodo ya se conoce, por lo que procede a determinar $I_{R_{sh}}$, para esto se utiliza el siguiente circuito:

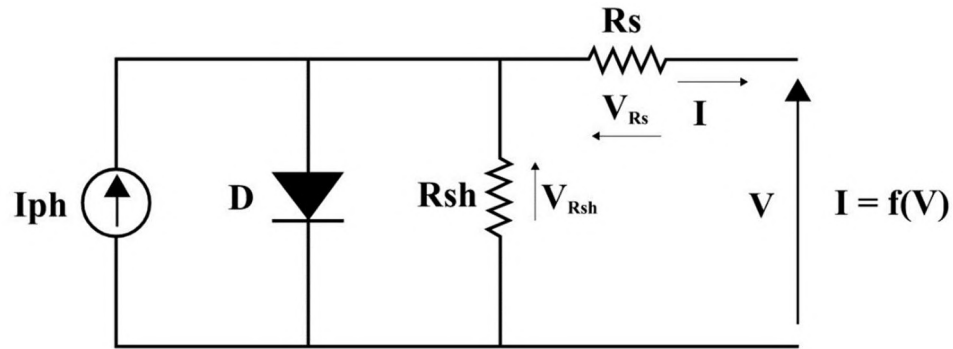


Figura 7-3: Circuito para determinar $I_{R_{sh}}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

Dónde:

$$V_{R_{sh}} = V_{R_s} + V \quad (5.3)$$

Aplicando la ley de Ohm:

$$V_{R_s} = R_s * I \quad (6.3)$$

Y, reemplazando la ecuación (6.3) en la ecuación (5.3), se obtiene el voltaje de la resistencia en paralelo o Shunt:

$$V_{R_{sh}} = R_s * I + V \quad (7.3)$$

Aplicando la ley de Ohm:

$$I_{R_{sh}} = \frac{V_{R_{sh}}}{R_{sh}} \quad (8.3)$$

Y, reemplazando en la ecuación (4.3), finalmente se obtiene la ecuación característica del circuito equivalente de un panel fotovoltaico:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{R_s I + V}{nV_T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I + V}{R_{sh}} \quad (9.3)$$

Dónde:

I_{ph} : Fotocorriente

I: Corriente de salida de la celda solar

V: Voltaje de salida de la celda solar

I_0 : Corriente inicial de la corriente de saturación inversa del diodo

V_D : Voltaje del diodo en la corriente de saturación inversa del diodo en la celda

n: Factor de idealidad del diodo

V_T : voltaje térmico del diodo que depende de su temperatura

R_s : Resistencia en serie que representa las conexiones en el panel solar

R_{sh} : Resistencia de Shunt en paralelo

De la ecuación (9.3), es necesario determinar la corriente y el voltaje, para esto dado que se trata de una ecuación no lineal, en donde intervienen varios parámetros desconocidos, se utiliza el método iterativo de Newton Raphson bajo las condiciones estándar, descritas por el fabricante en la ficha técnica del panel, posterior a esto se utiliza Matlab para implementar y simular el modelo.

3.9.2.1 Determinación de los parámetros involucrados en la ecuación del circuito equivalente del panel fotovoltaico.

Dentro de la ecuación de la corriente de salida del panel fotovoltaico, ecuación (9.3), existen parámetros que son determinados a partir de la ficha técnica proporcionada por el fabricante y otros que se desconocen, por lo que es necesario determinar inicialmente los parámetros de referencia, estos bajo las condiciones estándar propuestas por el fabricante, con una Irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de la celda de 25°C.

Entonces, en función a los parámetros de referencia y considerando que $A = nV_T$, la ecuación (9.3) queda de la siguiente manera:

$$I = I_{phref} - I_{0ref} \left(\exp \left(\frac{R_{sref}I + V}{A_{ref}} \right) - 1 \right) - \frac{R_{sref}I + V}{R_{shref}} \quad (10.3)$$

Para determinar los 5 parámetros de referencia, que son: I_{phref} , I_{0ref} , A_{ref} , R_{sref} y R_{shref} , se debe formar un sistema de ecuaciones para la resolución por el método iterativo de Newton Raphson.

- Ecuación de la corriente en corto circuito

Considerando: $I = I_{sc}$ y $V = 0$

$$I_{sc\text{ref}} - I_{ph\text{ref}} - I_{0\text{ref}} \left(\exp\left(\frac{I_{sc\text{ref}} R_{s\text{ref}}}{A_{\text{ref}}}\right) - 1 \right) + \frac{I_{sc\text{ref}} R_{s\text{ref}}}{R_{sh\text{ref}}} = 0 \quad (11.3)$$

- Ecuación de la corriente en circuito abierto

Considerando: $I = 0$ y $V = V_{oc}$

$$I_{ph\text{ref}} - I_{0\text{ref}} \left(\exp\left(\frac{V_{oc\text{ref}}}{A_{\text{ref}}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{oc\text{ref}}}{R_{sh\text{ref}}} = 0 \quad (12.3)$$

- Ecuación de la corriente en la máxima potencia

Considerando: $I = I_m$ y $V = V_m$

$$I_{m\text{ref}} = I_{ph\text{ref}} - I_{0\text{ref}} \left(\exp\left(\frac{V_{m\text{ref}} + I_{m\text{ref}} R_{s\text{ref}}}{A_{\text{ref}}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{m\text{ref}} + I_{m\text{ref}} R_{s\text{ref}}}{R_{sh\text{ref}}} = 0 \quad (13.3)$$

- Derivada de la ecuación (3.9) con $V = V_{oc}$:

$$\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} = -R_{s0} \quad (14.3)$$

- Derivada de la ecuación (3.9) con $I = I_{sc}$:

$$\frac{dV}{dI} \Big|_{I_{sc}} = -R_{sh0} \quad (15.3)$$

Dónde R_{s0} es la pendiente en el punto de circuito abierto y R_{sh0} es la pendiente en el punto de cortocircuito.

De la ecuación (12.3), se deriva la expresión de la fotocorriente y reemplazando en las ecuaciones (11.3) y (13.3), se obtiene el siguiente sistema de 4 ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} I_{0ref} \left\{ \exp\left(\frac{V_{ocref}}{A_{ref}}\right) - \exp\left(\frac{I_{scref}R_{sref}}{A_{ref}}\right) \right\} - I_{scef} \left(1 + \frac{R_{sref}}{R_{shref}}\right) + \frac{V_{ocref}}{R_{shref}} &= 0 \\ I_{mref} - I_{0ref} \left\{ \exp\left(\frac{V_{ocref}}{A_{ref}}\right) - \exp\left(\frac{V_{mref} + I_{mref}R_{sref}}{A_{ref}}\right) \right\} + \frac{V_{mref} + I_{mref}R_{sref}}{R_{shref}} - \frac{V_{ocref}}{R_{shref}} &= 0 \\ (R_{s0} - R_{sref}) \left\{ \frac{1}{R_{shref}} + \frac{I_{oref}}{A_{ref}} \exp\left(\frac{V_{ocref}}{A_{ref}}\right) \right\} - 1 &= 0 \\ \frac{1}{R_{shref}} - \frac{1}{R_{sh} - R_{sref}} + \frac{I_{oref}}{A_{ref}} \exp\left(\frac{I_{scref}R_{sref}}{A_{ref}}\right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16.3)$$

Según (Sadok y Mehdaoui 2008) se emplean mediciones reales y ecuaciones de traspaso, para calcular los parámetros antes enunciados, de la siguiente manera:

$$I_{STC} = I_{med} \left(\frac{G_{STC}}{G_{med}}\right) + \alpha(T - T_{STC}) = 0 \quad (17.3)$$

$$V_{STC} = V_{med} - \beta(T_{STC} - T) - R_{smed}(I_{med} - I_{STC}) + V_t \ln\left(\frac{G_{STC}}{G_{med}}\right) \quad (18.3)$$

Dónde:

I_{STC} : corriente del módulo en STC (A);

G_{STC} : referencia de irradiación solar a 1000 W/m²;

G_{med} : irradiancia medida en W/m²;

α : coeficiente de temperatura para la corriente ($A/^{\circ}C$);

T_{STC} : referencia de temperatura del módulo ($^{\circ}C$);

T : temperatura medida en el módulo ($^{\circ}C$);

V_{STC} : voltaje obtenido en el módulo (V);

β : es el coeficiente de temperatura del voltaje ($V/^{\circ}C$);

I_{med} : corriente medida en el módulo (A);

V_{med} : voltaje medido en (V);

R_{smed} : resistencia en serie medida (Ω);

V_t : voltaje térmico del módulo (V);

Para determinar la temperatura del módulo, se utiliza la ecuación (3.19), que considera la temperatura nominal de funcionamiento de la celda (NOCT). Este parámetro brinda una simplificación para determinar dicha temperatura, que en la práctica representa un desafío debido a la complejidad del equilibrio térmico afectado principalmente por el contacto entre las células fotovoltaicas individuales y la influencia de algunos factores como la velocidad del viento, el diseño, la estructura, etc., lo que hace que la medición de la temperatura de un dispositivo fotovoltaico, sea un proceso difícil, por tal motivo Mohammed, Boumediene y Miloud (2016), proponen la ecuación conocida como el modelo de temperatura celular.

$$T_c = T_a + \frac{G}{800} (NOCT - 20) \quad (19.3)$$

Posteriormente, las ecuaciones (20.3), (21.3), (22.3) y (23.3) proporcionan las expresiones matemáticas para: I_{scref} , V_{ocref} , I_{mref} y V_{mref} ; que al ser ingresados en el sistema de ecuaciones (3.16) permite determinar analíticamente los parámetros: I_{0ref} , A_{ref} , R_{sref} y R_{shref} ; para finalmente usando la ecuación (3.12) encontremos el quinto parámetro I_{phref} .

$$I_{scref} = I_{scmed} \left(\frac{G_{STC}}{G_{med}} \right) + \alpha (T - T_{STC}) \quad (3.20)$$

$$V_{ocref} = V_{ocmed} - \beta (T_{STC} - T) + V_t \ln \left(\frac{G_{STC}}{G_{med}} \right) \quad (3.21)$$

$$I_{mref} = I_{mmed} \left(\frac{G_{STC}}{G_{med}} \right) + \alpha (T - T_{STC}) \quad (3.22)$$

$$V_{mref} = V_{mmed} - \beta (T_{STC} - T) - R_{smed} (I_{med} - I_{mref}) + V_t \ln \left(\frac{G_{STC}}{G_{med}} \right) \quad (3.23)$$

3.9.2.2 *Determinación de los parámetros involucrados en la ecuación del circuito equivalente del panel fotovoltaico, en condiciones reales*

Los parámetros en condiciones reales son descritos en la curva I-V y dependen de la temperatura de la celda, la irradiancia y de los valores de referencia, esta interdependencia, está descrita por un grupo de ecuaciones descritas en Duffie, Beckman y Blair (2020).

- Factor de idealidad modificado

$$A = A_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) \quad (24.3)$$

- Corriente de saturación del diodo
-

$$I_0 = I_{0ref} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{E_g N_s}{A_{ref}} \left(1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \right] \quad (25.3)$$

- Fotocorriente

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{phref} + \alpha(T - T_{ref})] \quad (26.3)$$

- Resistencia en serie R_s

$$R_s = R_{sref} \quad (27.3)$$

- Resistencia de Shunt R_{sh}

$$R_{sh} = R_{shref} \left(\frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (28.3)$$

Una vez que se tienen los parámetros de referencia y los parámetros en condiciones reales, se obtienen las ecuaciones descritas a continuación, que permiten calcular la I_{sc} , V_{oc} , I_m y V_m en cualquier condición de irradiancia y temperatura.

$$I_{sc} = I_{scref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (29.3)$$

$$V_{oc} = V_{ocref} - \beta(T_{ref} - T) \quad (30.3)$$

$$I_m = I_{mref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (31.3)$$

$$V_m = V_{mref} - \beta(T_{ref} - T) \quad (32.3)$$

3.10 Validación del modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba

Para validar el modelo, se tomaron mediciones horarias del voltaje y la corriente de salida del panel GP-100P-36, desde el 01 hasta el 07 de enero de 2024; con la finalidad de determinar la precisión del modelo, tomando en cuenta que en los datos proporcionados por la estación meteorológica existen valores para la radiación desde las 7h00 hasta las 19h00,

3.10.1 Metodología de validación propuesta para el modelo

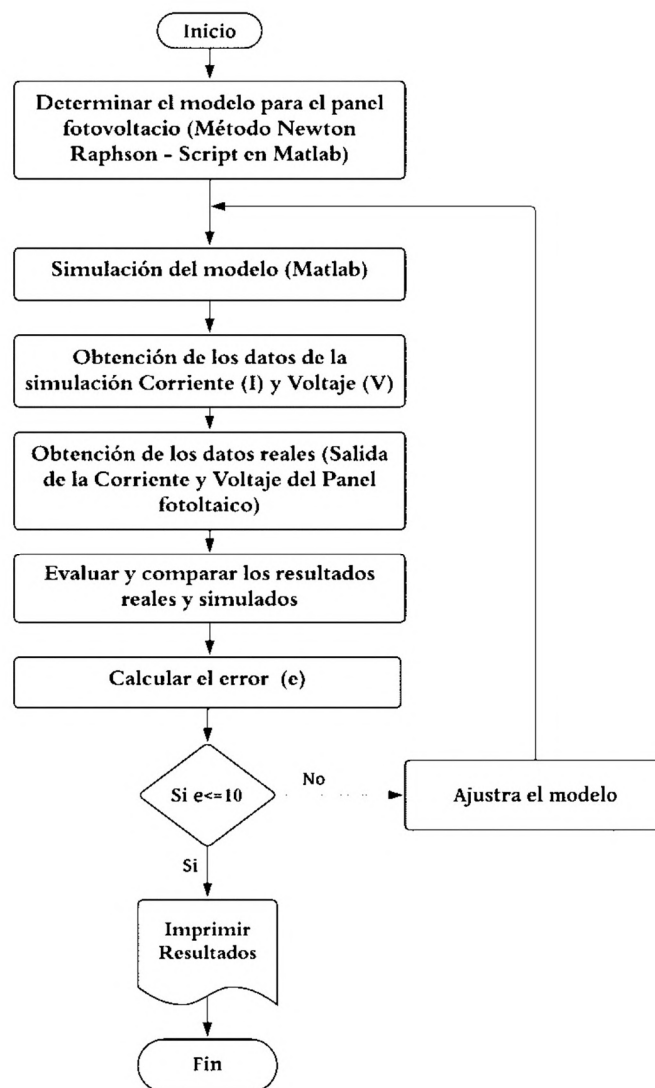


Gráfico 3-1: Metodología de validación del modelo

Realizado por: Aguirre D., 2024

Además, es necesario mencionar que para la simulación y el desarrollo de las ecuaciones que conforman el modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo las condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, se ha empleado el software MATLAB, debido a su capacidad para realizar cálculos numéricos avanzados, resolver ecuaciones diferenciales, y su versatilidad para el análisis y la visualización de datos. Además, aprovechamos las herramientas y funciones específicas de MATLAB diseñadas para la simulación de sistemas de energía renovable, lo que nos permite obtener resultados precisos y relevantes para nuestro estudio en particular.

Finalmente se procede a calcular el RMSE, que es la medida de la raíz de la media de los errores al cuadrado entre los valores obtenidos de la simulación y observados/reales (Singla, Duhan y Saroha 2022b).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{i\text{ cal}} - I_{i\text{ exp}})^2}{N}} \quad (33.3)$$

Dónde:

$I_{i\text{ cal}}$: Valores de la corriente simulados

$I_{i\text{ exp}}$: Valores de la corriente reales

N: Número total de observaciones

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presenta el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos sobre el tema de este trabajo de investigación: Modelo generación de energía solar fotovoltaica en la ciudad de Riobamba, cuyo principal objetivo es evaluar la viabilidad y eficacia del modelo propuesto, que considera principalmente las condiciones físicas y meteorológicas específicas del lugar. Como se ha mencionado anteriormente la ciudad de Riobamba está situada en un entorno geográfico y climático particular, lo que hace que se presenten desafíos únicos que influyen directamente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, factores como la radiación solar, temperatura, velocidad del viento y patrones climáticos, y variaciones estacionales son considerados en este estudio para determinar cómo afectan la producción de energía solar.

El análisis e interpretación de los resultados inicia con una revisión detallada de los datos recogidos, incluyendo mediciones de radiación solar y temperaturas registradas a lo largo del año, luego se comparan los datos con los resultados simulados obtenidos mediante el uso del software MATLAB, que ha permitido modelar el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo diversas condiciones meteorológicas. Se ha investigado no solo la correlación entre los datos simulados y los datos reales, sino también las posibles causas de las discrepancias encontradas, este enfoque crítico permite ajustar el modelo para aumentar su precisión y fiabilidad, proponiendo así recomendaciones específicas para la implementación y mejora continua del sistema de generación de energía solar en Riobamba.

Finalmente, se discutirán las implicaciones de estos hallazgos para futuras investigaciones y para la práctica de la implementación de sistemas fotovoltaicos en regiones con características climáticas y geográficas similares a las de Riobamba.

4.1 Análisis del comportamiento de la radiación solar y temperatura en la ciudad de Riobamba

Siguiendo la metodología establecida en el apartado 3.8.2, se ha podido representar las gráficas de la radiación y temperatura promedio mensual durante los años 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021 y 2023; recalando que, pese a que la estación meteorológica proporcionó datos de radiación

temperatura para el año 2018 y 2023, se los ha descartado debido a su irregularidad, existencia de ceros o falta de continuidad en los datos, esto con la finalidad de evitar resultados erróneos en la simulación.

4.1.1 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2015

En el año 2015 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0,86; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00.

El Gráfico 1-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2015, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en el mes de marzo con 268,33 W/m² y el máximo durante el mes de septiembre con 386,59 W/m²; a diferencia de la temperatura que es más estable existiendo una diferencia de 1.7 °C, entre su valor máximo que se presenta en el mes de febrero con 14,27°C y el mínimo en el mes de junio con 12,57°C.

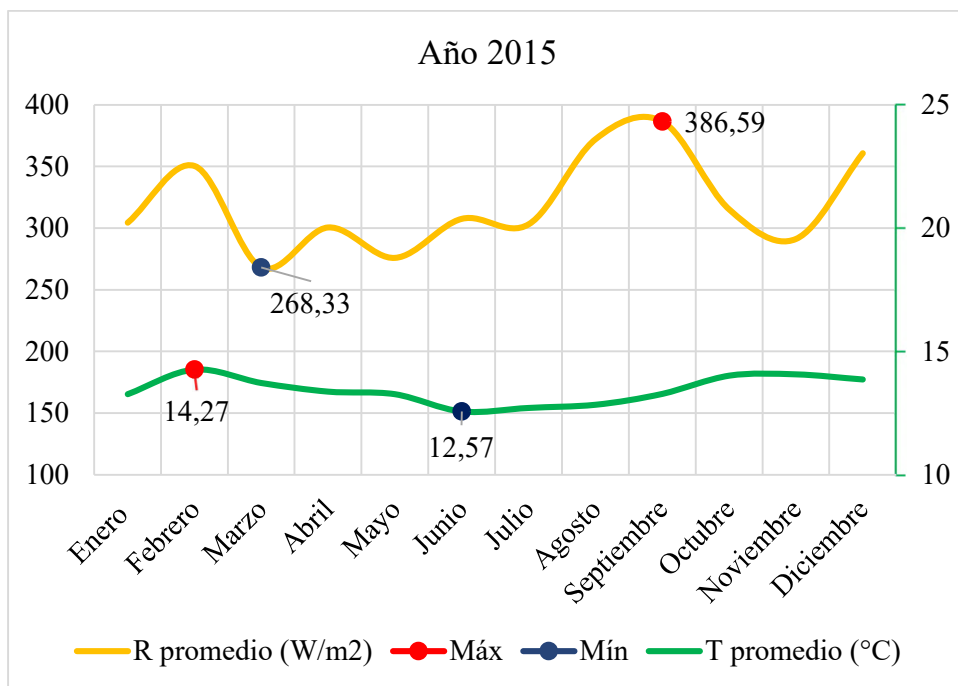


Gráfico 1-4: Radiación y temperatura durante el año 2015

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.2 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2016

En el año 2016 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0,84; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00, para determinar los valores máximos y mínimos se despreciaron los promedios del mes de enero y diciembre, debido a que no hay mediciones de todo el mes.

El Gráfico 2-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2016, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en el mes de marzo con $254,55 \text{ W/m}^2$ y el máximo durante el mes de agosto con $444,62 \text{ W/m}^2$; a diferencia de la temperatura que es más estable existiendo una diferencia de $2,49 \text{ }^\circ\text{C}$, entre su valor máximo que se presenta en el mes de noviembre con $14,70^\circ\text{C}$ y el mínimo en el mes de julio con $12,31^\circ\text{C}$.

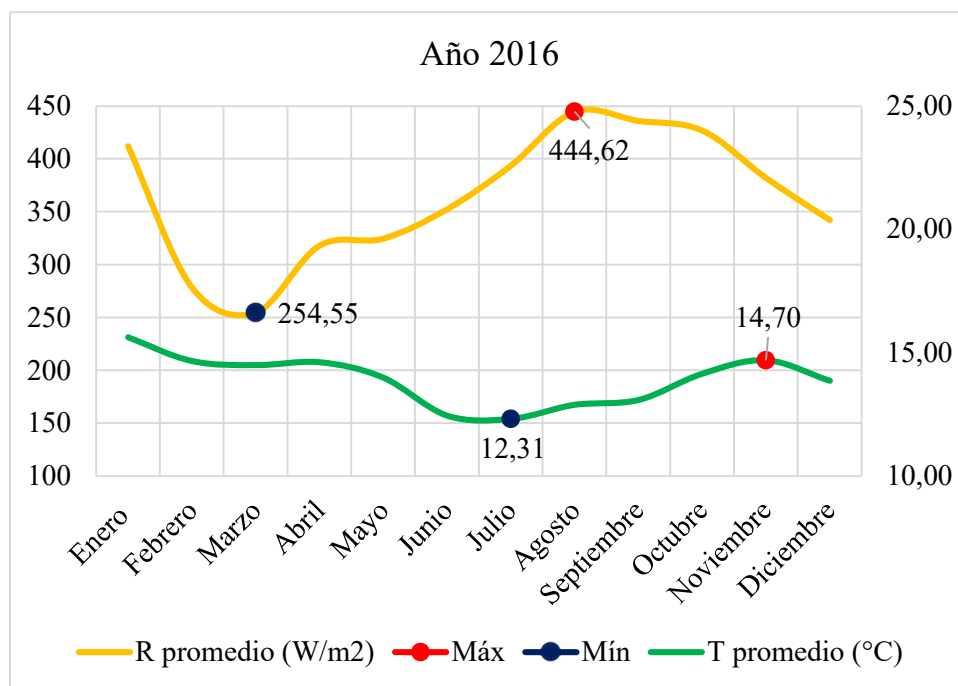


Gráfico 2-4: Radiación y temperatura durante el año 2016

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.3 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2017

En el año 2017 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0,87; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00; sin embargo, existen días en los que existen mediciones para la radiación desde las 06h00.

El Gráfico 3-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2017, en donde se puede observar que los valores máximos y mínimos para las dos variables coinciden el mismo mes, durante el mes de julio se tiene una temperatura de 11,87°C y una radiación de 350,3 W/m² que corresponden a los valores mínimos y en el mes de noviembre una temperatura de 14,26°C y una radiación de 409,74 W/m², que representan los valores máximos.

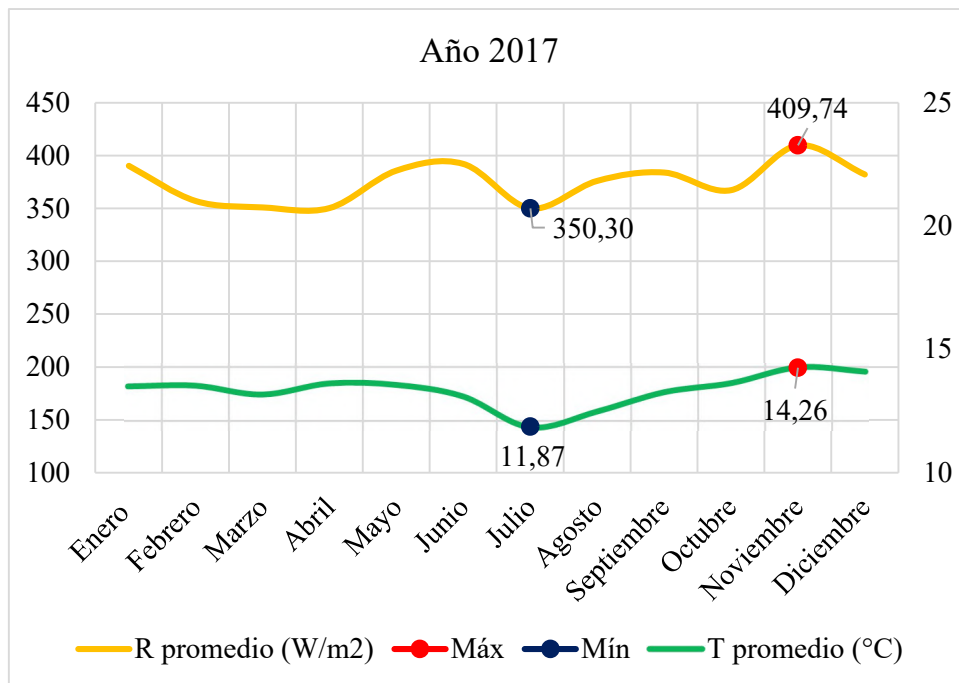


Gráfico 3-4: Radiación y temperatura durante el año 2017

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.4 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2019

En el año 2019 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0,83; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00.

El Gráfico 4-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2019, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en el mes de junio con 268.87 W/m^2 y el máximo durante el mes de diciembre con 436.04 W/m^2 ; a diferencia de la temperatura que es más estable existiendo una diferencia de 2.23°C , entre su valor máximo que se presenta en el mes de diciembre con $14,48^\circ\text{C}$ y el mínimo en el mes de agosto con $12,25^\circ\text{C}$.

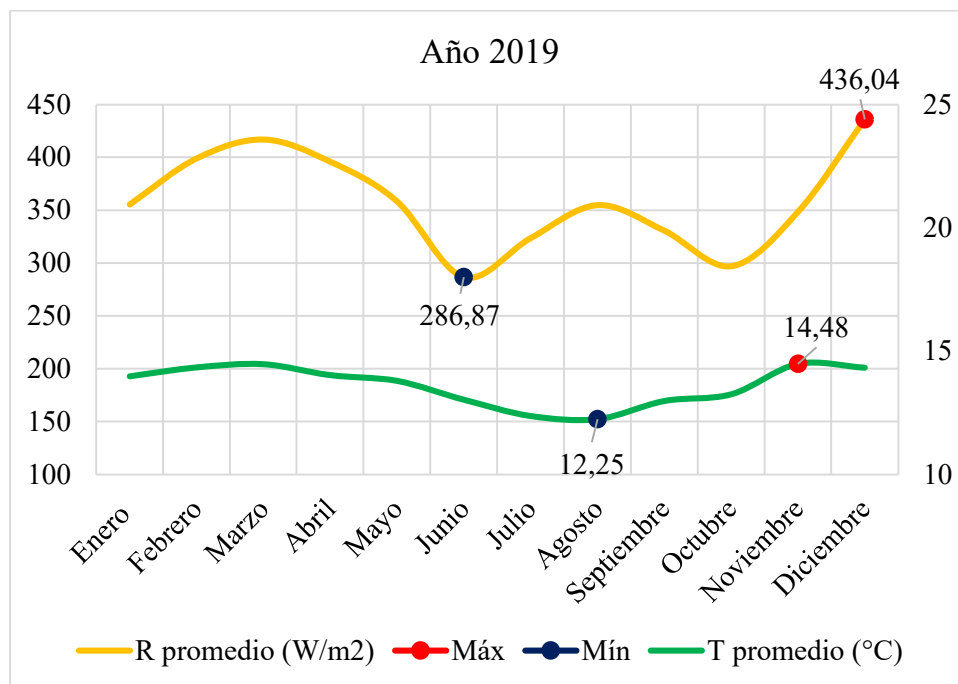


Gráfico 4-1: Radiación y temperatura durante el año 2019

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.5 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2020

En el año 2020 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0,7; lo que indica una correlación alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace también, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00.

El Gráfico 5-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2020, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en diciembre con 268.87 W/m^2 y el máximo durante el mes de agosto con 512.96 W/m^2 ; a diferencia de la temperatura que es más estable existiendo una diferencia de 2.53°C , entre su valor máximo que se presenta en el mes de marzo con $14,78^\circ\text{C}$ y el mínimo en el mes de agosto con $12,45^\circ\text{C}$.

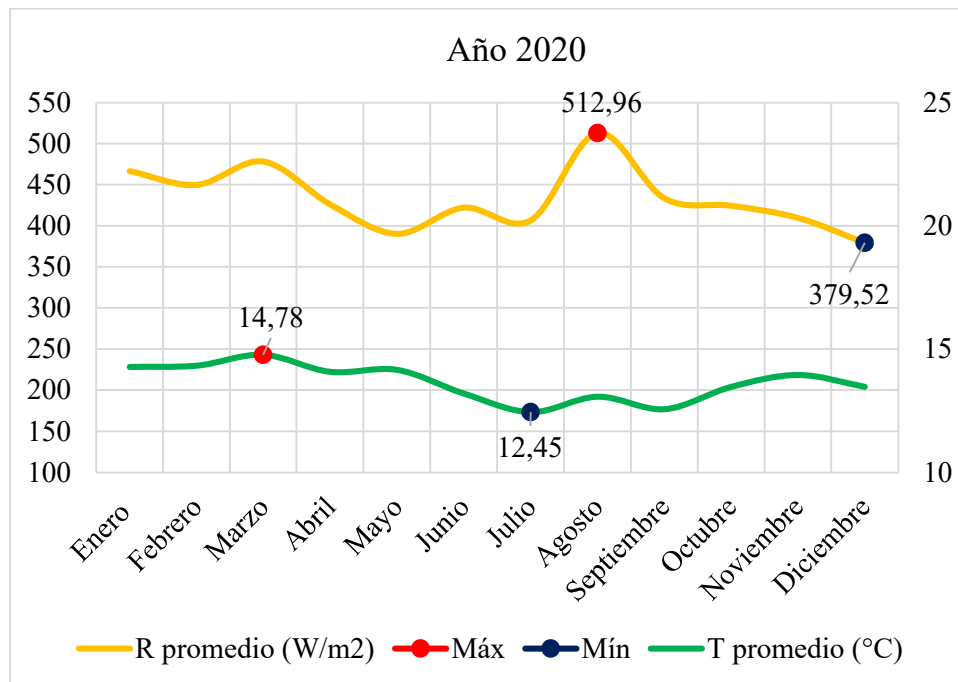


Gráfico 5-4: Radiación y temperatura durante el año 2020

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.6 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2021

En el año 2021 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0.78; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00, aunque en este año también existen mediciones de radiación fuera del periodo de tiempo establecido.

El Gráfico 6-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2021, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en mayo con $350,55 \text{ W/m}^2$ y el máximo durante el mes de diciembre con $434,92 \text{ W/m}^2$; que coincide el mes donde se presenta el valor máximo de la temperatura con $14,31^\circ\text{C}$ y su valor mínimo en julio con $12,47^\circ\text{C}$, que al igual que en los casos anteriores se aprecia que la temperatura no varía notablemente a lo largo del año.

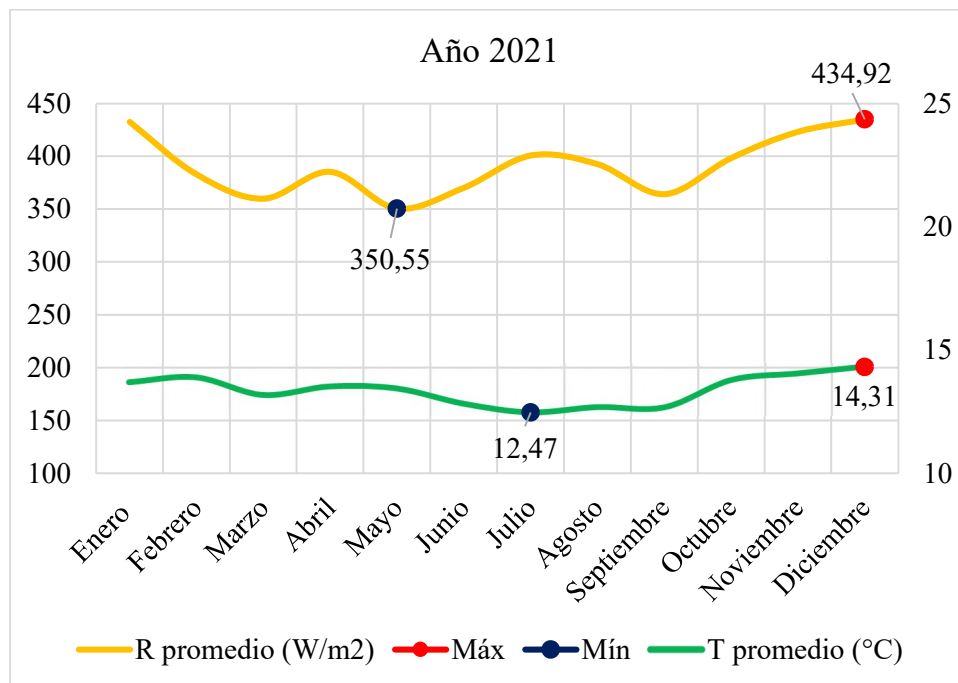


Gráfico 6-4: Radiación y temperatura durante el año 2021

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.1.7 Radiación y temperatura en la ciudad de Riobamba durante el año 2022

En el año 2022 existe una correlación entre las mediciones de las dos variables de 0.73; lo que indica una correlación muy alta entre la radiación y la temperatura, es decir que si una variable aumenta la otra lo hace en la proporción considerablemente alta, se calcula el promedio mensual con la radiación efectiva desde las 07h00 hasta las 19h00, aunque en este año también existen mediciones de radiación fuera del periodo de tiempo establecido.

El Gráfico 7-4, representa el comportamiento de la radiación y temperatura a lo largo del año 2022, en donde se puede observar que existe una variación considerable en los valores promedios de la radiación con su valor mínimo en mayo con $361,65 \text{ W/m}^2$ y el máximo durante el mes de enero con $472,42 \text{ W/m}^2$; a diferencia de la temperatura que es más estable existiendo una diferencia de $2,53^\circ\text{C}$, entre su valor máximo que se presenta en el mes de marzo con $14,78^\circ\text{C}$ y el mínimo en el mes de agosto con $12,12^\circ\text{C}$.

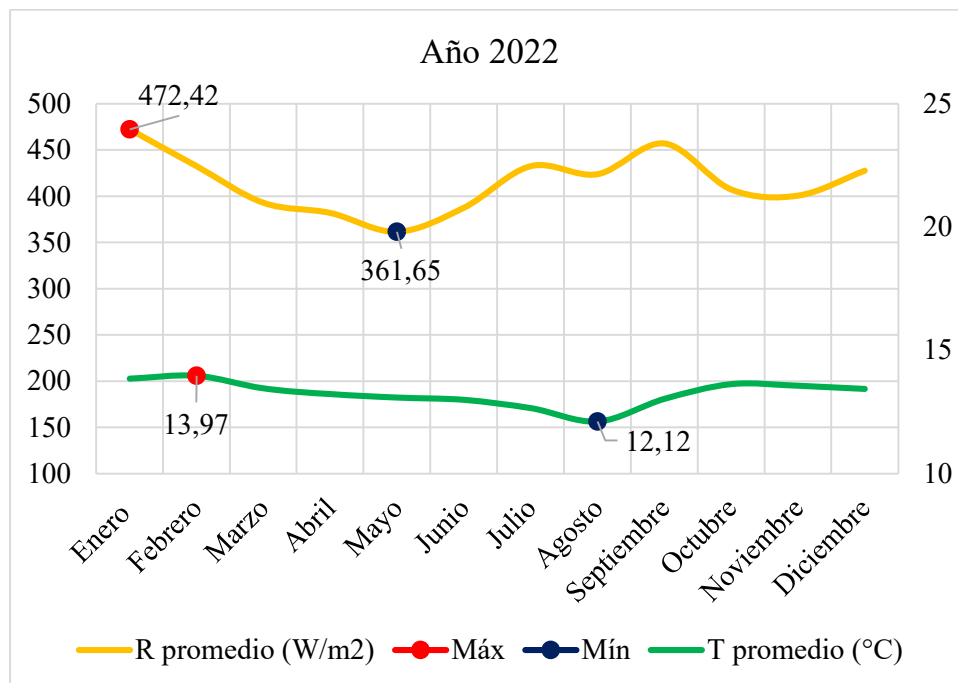


Gráfico 7-4: Radiación y temperatura durante el año 2022

Realizado por: Aguirre D., 2024

En los gráficos 8-4 y 9-4, se presenta un análisis promedio anual tanto de radiación solar y temperatura, que permite observar las fluctuaciones de estas variables durante los años de estudio para la elaboración de este trabajo de investigación:

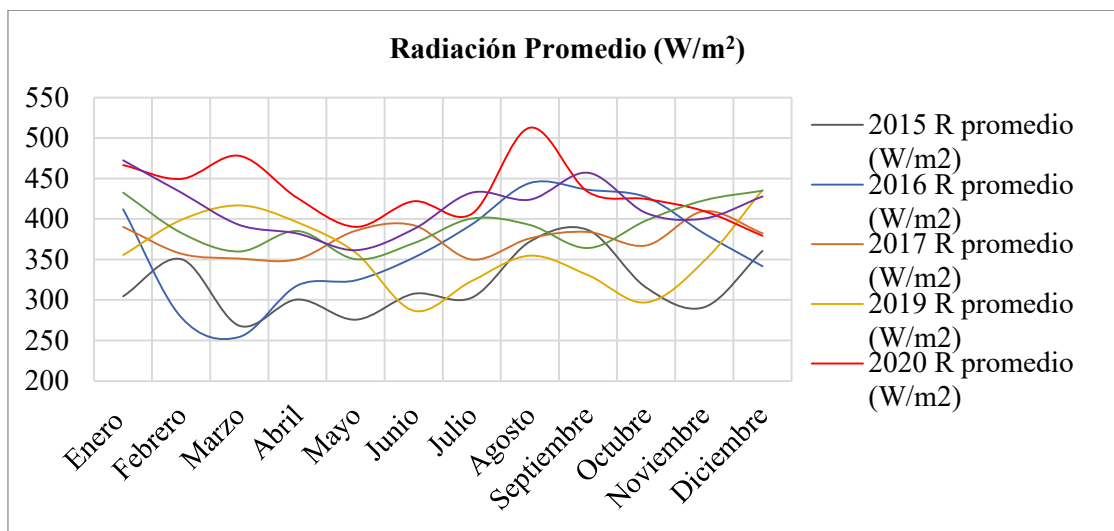


Gráfico 8-4: Comportamiento de la radiación promedio anual

Realizado por: Aguirre D., 2024

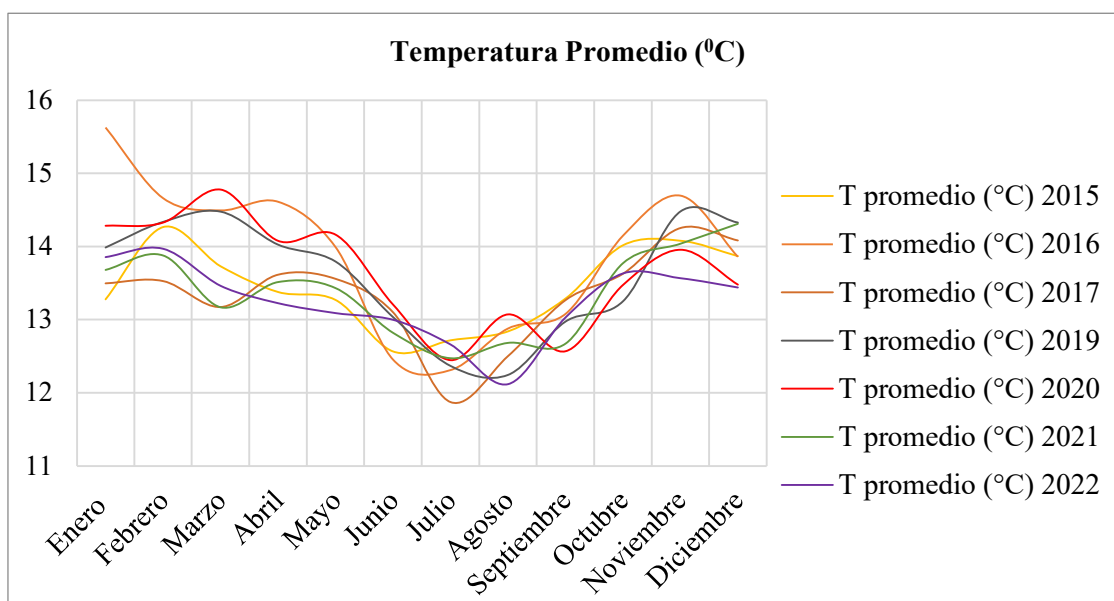


Gráfico 9-4: Comportamiento de la temperatura promedio anual

Realizado por: Aguirre D., 2024

Los datos que han sido analizados estadísticamente, como se puede observar describen algunos factores importantes sobre la relación que existe entre la radiación solar y la temperatura en la

ciudad de Riobamba, a pesar de existir una correlación alta entre los datos tomados por la estación meteorológica, a continuación, se describen algunos hallazgos relevantes:

- **Consistencia de la temperatura frente a la variabilidad en la radiación:** se podría pensar que la temperatura está estrechamente relacionada con la radiación solar, que a medida que aumenta, la radiación debería hacerlo también, sin embargo, se puede observar en todos los años la temperatura permanece casi constante variando máximo 2.5°C entre su máximo y mínimo, esto puede darse por otros factores que moderan la temperatura, como la velocidad del aire, la humedad, la cobertura de nubes y la geografía local. En la ciudad de Riobamba, la geografía juega un papel crucial, al contar con una diversidad notoria y estar marcada por la presencia de la cordillera de los Andes, lo que provoca variaciones climáticas considerables y cambios en la distribución de calor.
- **Máximos y mínimos asincrónicos:** en la mayoría de los años, no coinciden los meses donde la radiación es máxima y/o mínima, con los valores máximos y/o mínimos de la temperatura, esto puede darse por influencia de la altitud y las estaciones del año, recordando que en la ciudad de Riobamba se consideran dos estaciones o temporadas, una húmeda que se presenta desde el mes de octubre hasta mayo, donde la cantidad de lluvia es significativa, la humedad relativa es más alta; y, una temporada seca, que se extiende desde junio hasta septiembre en donde los días son mayormente secos y soleados.
- **Influencia de la cobertura de nubes y otros factores ambientales:** la cobertura de nubes puede reducir significativamente la radiación solar que llega al suelo, pero no necesariamente resulta en una reducción proporcional de la temperatura, especialmente si hay humedad o viento que pueden ayudar a mantener las temperaturas.
- **Desfase temporal entre picos de radiación y temperatura:** la observación de que los valores máximos de radiación no coinciden con los máximos de temperatura podría indicar un desfase temporal entre la recepción de radiación solar y el momento en que esta radiación se convierte efectivamente en calor ambiental, esto es bastante común y se debe a varios factores, como la capacidad térmica del suelo y el entorno, que pueden absorber calor y liberarlo más tarde.

4.2 Caracterización del panel Fotovoltaico GP-100P-36

Según la ficha técnica del fabricante Gi-Power New Energy (2023), este tipo de panel está diseñado para ofrecer una potencia máxima de 100W, bajo condiciones estándar: de irradiación solar 1000 W/m² y temperatura 25°C, sus celdas son policristalinas fabricadas de fragmentos de silicio fundido y garantiza las características de seguridad, protección ambiental, conservación de energía y uso conveniente, su energía principalmente se utiliza en hogares, minas, áreas remotas sin electricidad y campamentos al aire libre (Anexo A).

Tabla 1-4: Especificaciones eléctricas

Característica	Descripción
Potencia máxima (Pmax)	100 W
Eficiencia de la celda	17,64%
Voltaje a potencia máxima (Vmp)	18.7 V
Corriente a potencia máxima (Imp)	5.35 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.3 V
Corriente de corto circuito (Isc)	5,69 A
Voltaje máximo del sistema	800 V
Clasificación del fusible en serie	8
Número de diodos en derivación	2

Fuente: (Gi-Power New Energy 2023)

Realizado por: Aguirre D., 2024

Tabla 2-4: Coeficientes de temperatura

Característica	Descripción
Coeficiente de temperatura α (Isc)	0,08% / °C
Coeficiente de temperatura de voltaje β (Voc)	-0,32% / °C
Coeficiente de temperatura de potencia	-0,38% / °C
Temperatura nominal de las celdas Cells (NOTC)	46+2°C
Rango de temperaturas de aplicación	-40~ + 84°C

Fuente: (Gi-Power New Energy 2023)

Realizado por: Aguirre D., 2024

Tabla 3-4: Características mecánicas

Característica	Descripción
Dimensiones	1015 x 670 x 30 mm
Peso	7,2 kg
Células solares	36 celdas en serie (4x9)
Construcción	Vidrio templado de alta transmisión y bajo contenido de hierro
Marco	Aluminio anodizado, sirve principalmente para mejorar la resistencia a la corrosión. Color plata.

Fuente: (Gi-Power New Energy 2023)

Realizado por: Aguirre D., 2024

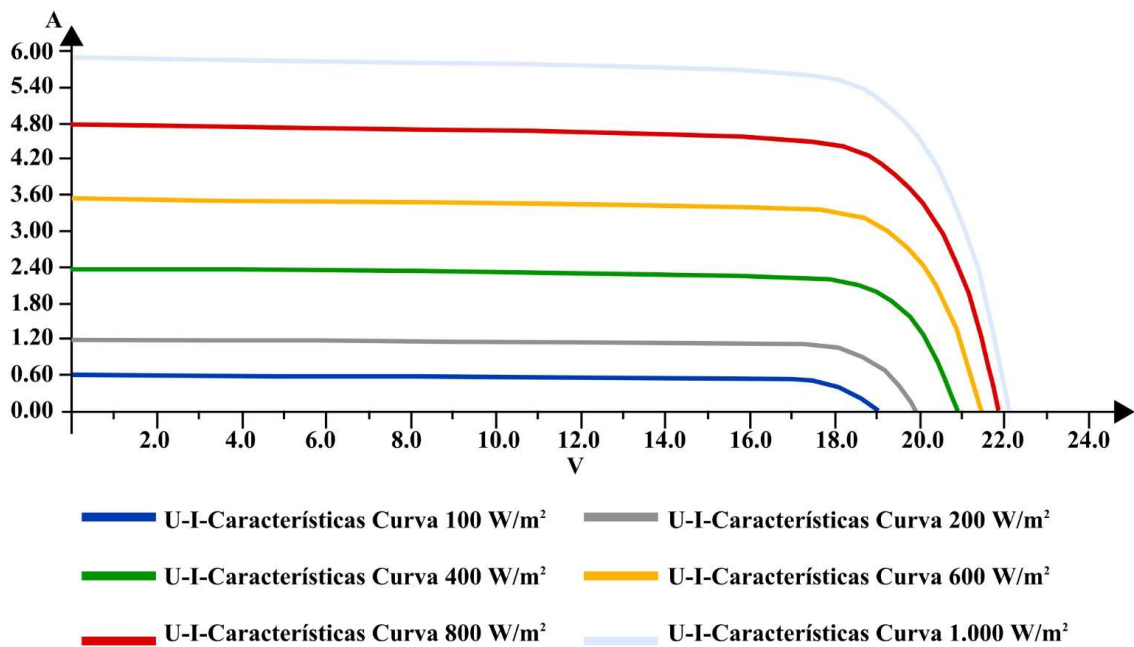


Figura 1-4: Curvas características del panel fotovoltaico a 25°C

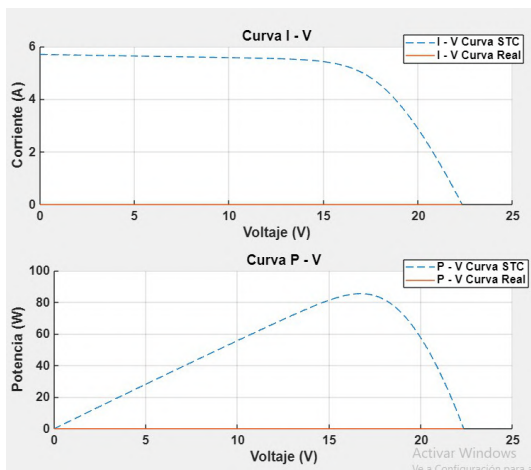
Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3 Modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba

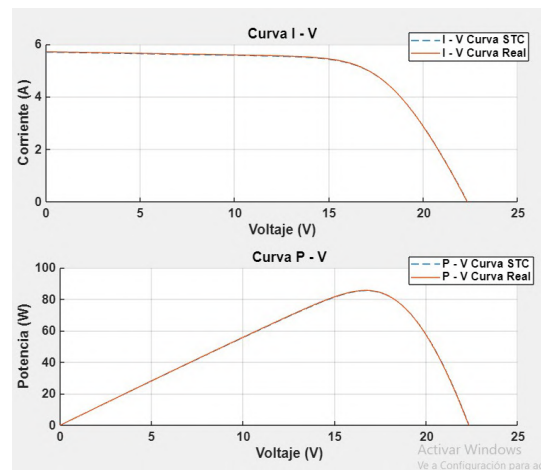
Una vez caracterizadas las propiedades meteorológicas y físicas de la ciudad de Riobamba y del panel fotovoltaico, se procede a realizar el modelo con las consideraciones establecidas previamente en el capítulo 3, y se ha dividido la modelación en tres partes: la primera que permite observar el comportamiento del panel fotovoltaico en condiciones reales, diferentes a las estándar; la segunda permite comparar los resultados de la modelación con los entregados por el panel fotovoltaico, para finalmente en la tercera parte predecir la generación de energía fotovoltaica bajo las condiciones particulares de la ciudad de Riobamba. Ver los Anexos B y C.

4.3.1 Comportamiento del panel fotovoltaico GP-100P-36 bajo condiciones reales

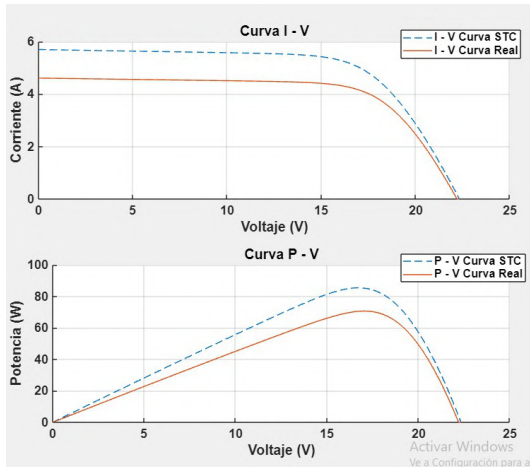
Con los datos del fabricante se representa la curva característica del panel a 1000 W/m^2 y 25°C , que corresponde a la curva en color azul, luego se ingresan datos de radiación y temperatura ambiente reales tomados de la base de datos de la estación meteorológica para obtener la curva real en color rojo y se observa el comportamiento del panel fotovoltaico al ir variando estas propiedades.



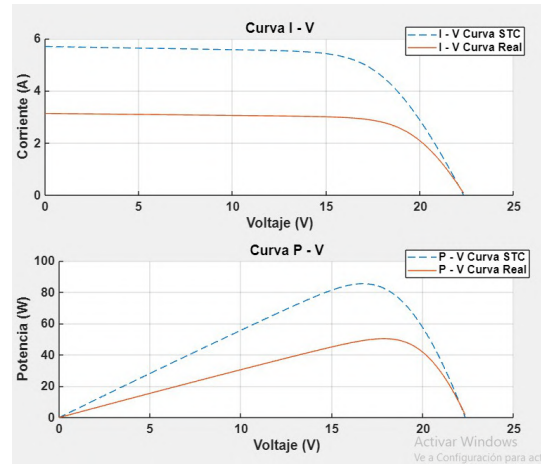
a)



b)



c)



d)

Gráfico 10-4: Curvas del panel fotovoltaico: a) Curva característica b) Curva en condiciones ideales $R=1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$ c) Curva a $R=825 \text{ W/m}^2$ y $T=23,5^\circ\text{C}$ y d) Curva $R=645 \text{ W/m}^2$ y $T=20^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

Representar la curva ideal y la curva real del panel fotovoltaico bajo las condiciones específicas de Riobamba permite evaluar y entender cómo las condiciones ambientales afectan el rendimiento de los paneles solares, además observar las desviaciones que se presentan entre las curvas permite ajustar el modelo teórico y así comprender como la radiación solar y la temperatura no dependen solo de las estaciones o temporadas, si no que se ven afectadas por factores diarios como la nubosidad, hora del día, la presencia de humedad incluso la presencia de polvo.

Cabe mencionar que el ingreso de los valores numéricos se ha limitado, la radiación a 2000 W/m^2 , la temperatura a 150°C y la velocidad del viento a $1,4 \text{ m/s}$ y que existen valores de radiación y temperatura que la modelación puede resolver devolviendo valores de voltaje y corriente, sin embargo, están fuera de la capacidad física del panel.

4.3.2 Validación del modelo de generación de energía solar fotovoltaica bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba

Para continuar con la validación del modelo, se sigue la metodología establecida en el Gráfico 6-3, se han recopilado datos directamente del panel fotovoltaico instalado en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, estos datos incluyen medidas del voltaje y la corriente

de salida del panel, medidos desde el 01 de enero hasta el 07 de enero de 2024 cada hora desde las 6h00 hasta las 18h00, sin embargo, también se han despreciado los valores en donde la estación meteorológica no toma medidas de la radiación, es decir que se ha medido el voltaje y la corriente desde las 07h00 hasta las 18h00, como se puede observar en la tabla 4-4. Para observar todos los datos almacenados ir al Anexo C.

Tabla 4-1: Datos de salida del panel fotovoltaico y la estación meteorológica

Fecha	Hora	Panel fotovoltaico		Estación meteorológica	
		Voltaje (V)	Corriente (A)	Radiación solar (W/m ²)	T ambiente (°C)
2/1/2024	7:00	20,94	0,21	62	12,5
	8:00	21,6	0,51	139	14,1
	9:00	22,14	1,14	287	15,5
	10:00	22,32	2	472	16,7
	11:00	22,32	2,45	541	18,1
	12:00	22,32	3,56	767	18,5
	13:00	22,32	4,02	852	18,8
	14:00	22,32	3,7	802	18,3
	15:00	22,32	2,37	536	17,6
	16:00	22,2	1,38	332	16,3
	17:00	22,08	0,96	247	15,1
	18:00	21	0,28	78	13,8
19:00	0	0	3	13,0	

Realizado por: Aguirre D., 2024

Los valores medidos son luego comparados con los resultados generados por la simulación en MATLAB, en donde sus variables de entrada son la radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento; el objetivo de esta comparación fue identificar las discrepancias entre los datos reales y los datos simulados de manera que se pueda ir ajustando el modelo hasta llegar a obtener el error más bajo, establecido un error permitido del 10%, esto debido a las condiciones climáticas intermitentes y otros factores como la presencia de humedad, polvo, nubes, la correlación de los datos, incluso la simplificación del modelo de simulación que puede ser que no integre todas las variables que intervienen y afectan de manera directa o indirecta en la generación de energía solar fotovoltaica etc.,

que contribuyen a la existencia de incertidumbres mayores y aleatoriedad en la potencia de salida de los paneles fotovoltaicos, tal como lo menciona Singla, Duhan y Saroha (2022).

Por lo que para este caso de estudio se inicia analizando la ecuación (3.10) en donde el parámetro de referencia A_{ref} involucra al factor de idealidad del semiconductor, que como se había indicado puede variar desde 1 hasta 2, y se determina que se logra llegar a tener errores menores al 10% cuando el factor de idealidad $n=1$.

A continuación, se realizan 6 ejercicios, para 3 días con dos horas distintas cada uno, en donde se podrán comparar los valores obtenidos de la simulación y los valores experimentales y/o reales obtenidos de la salida del panel fotovoltaico.

4.3.2.1 Caracterización y simulación para $G=747 \text{ W/m}^2$ y $T=19.4^\circ\text{C}$

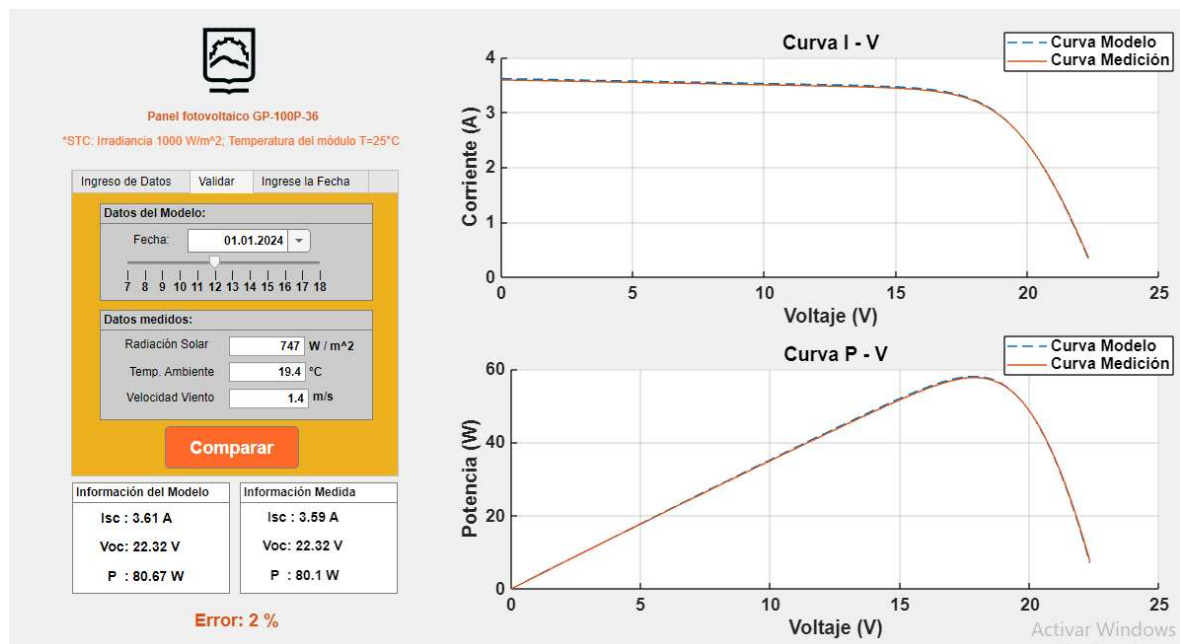


Figura 2-4: Simulación para $G=747 \text{ W/m}^2$ y $T=19.4^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3.2.2 Caracterización y simulación para $G=93 \text{ W/m}^2$ y $T=13.1^\circ\text{C}$

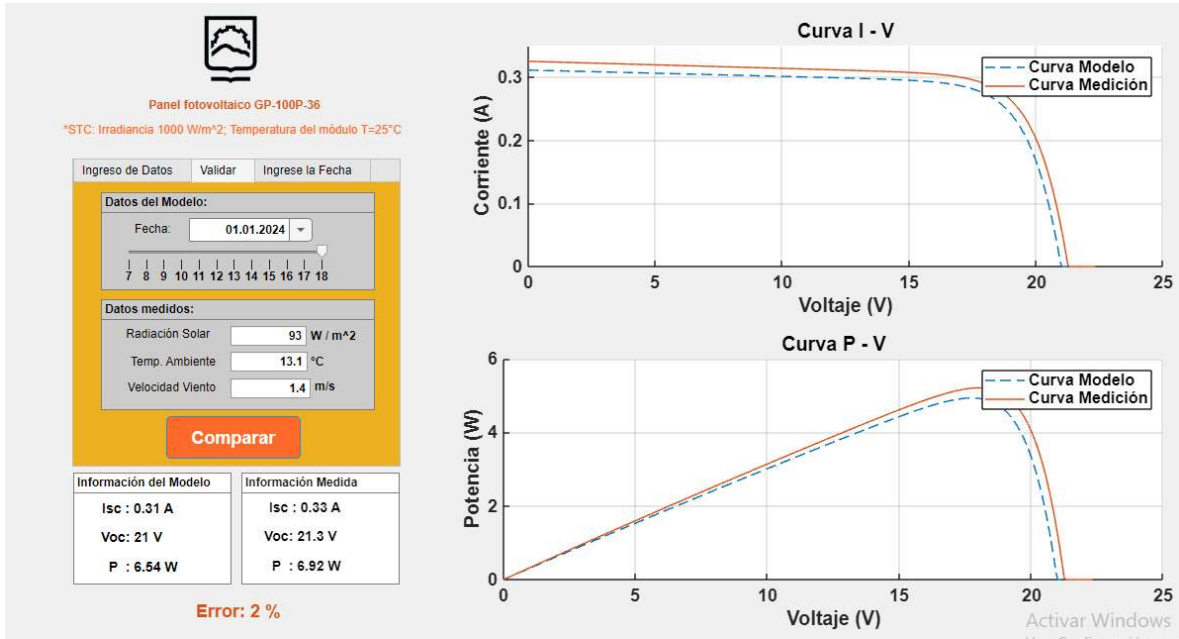


Figura 3-4: Simulación para $G=93 \text{ W/m}^2$ y $T=13.1^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3.2.3 Caracterización y simulación para $G=186 \text{ W/m}^2$ y $T=15.2^\circ\text{C}$

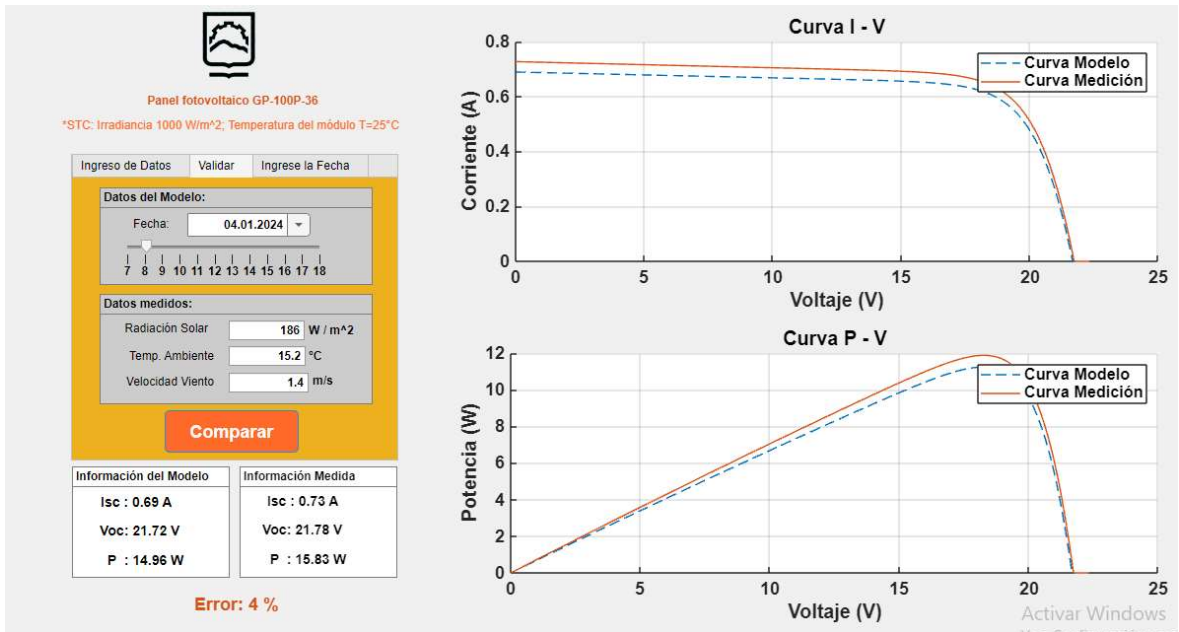


Figura 4-1: Simulación para $G=186 \text{ W/m}^2$ y $T=15.2^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3.2.4 Caracterización y simulación para $G=724 \text{ W/m}^2$ y $T=20.5^\circ\text{C}$

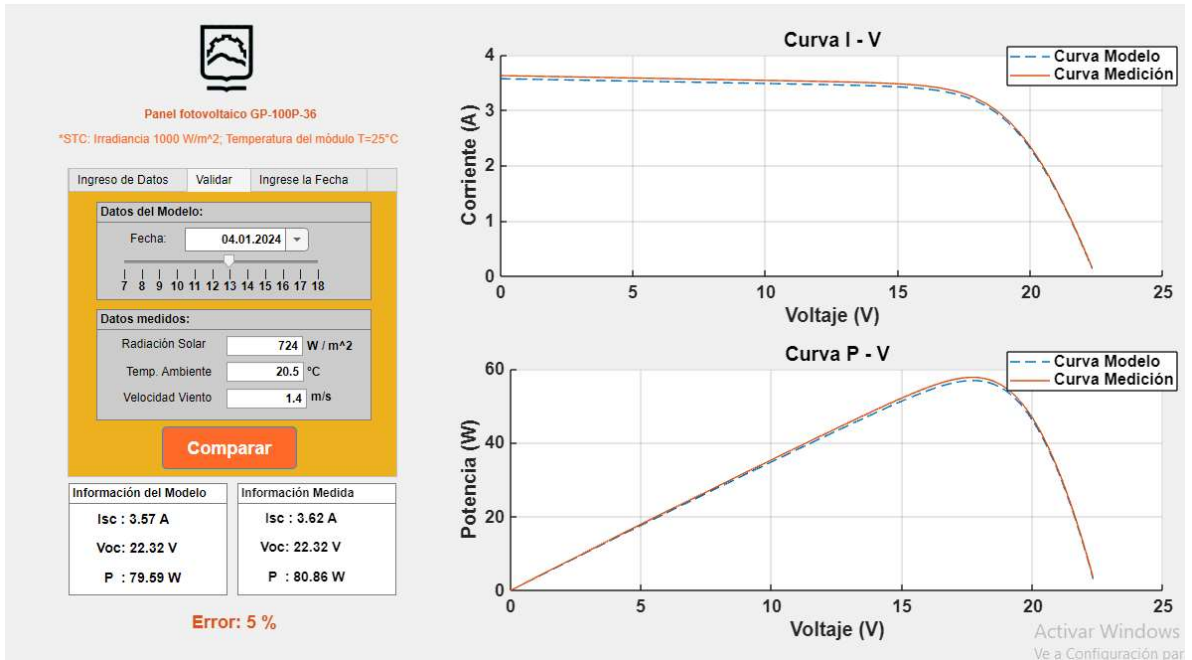


Figura 5-4: Simulación para $G=724 \text{ W/m}^2$ y $T=20.5^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3.2.5 Caracterización y simulación para $G= 927 \text{ W/m}^2$ y $T=19.7^\circ\text{C}$

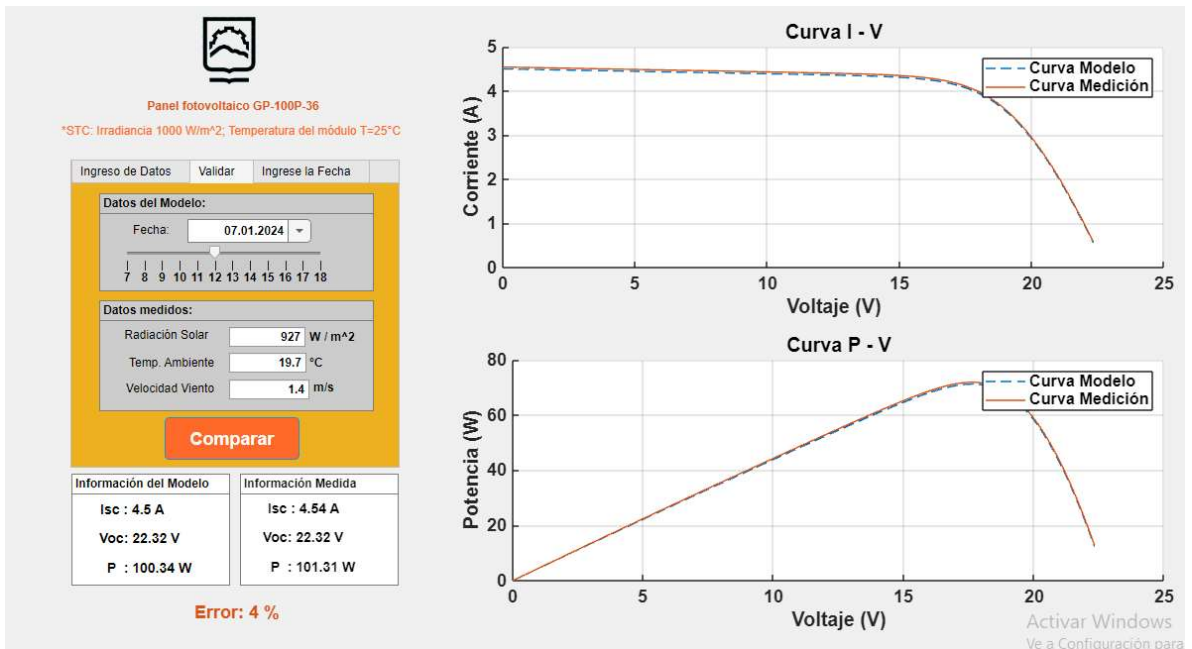


Figura 6-4: Simulación para $G= 927 \text{ W/m}^2$ y $T=19.7^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

4.3.2.6 Caracterización y simulación para $G= 262 \text{ W/m}^2$ y $T=15.1^\circ\text{C}$

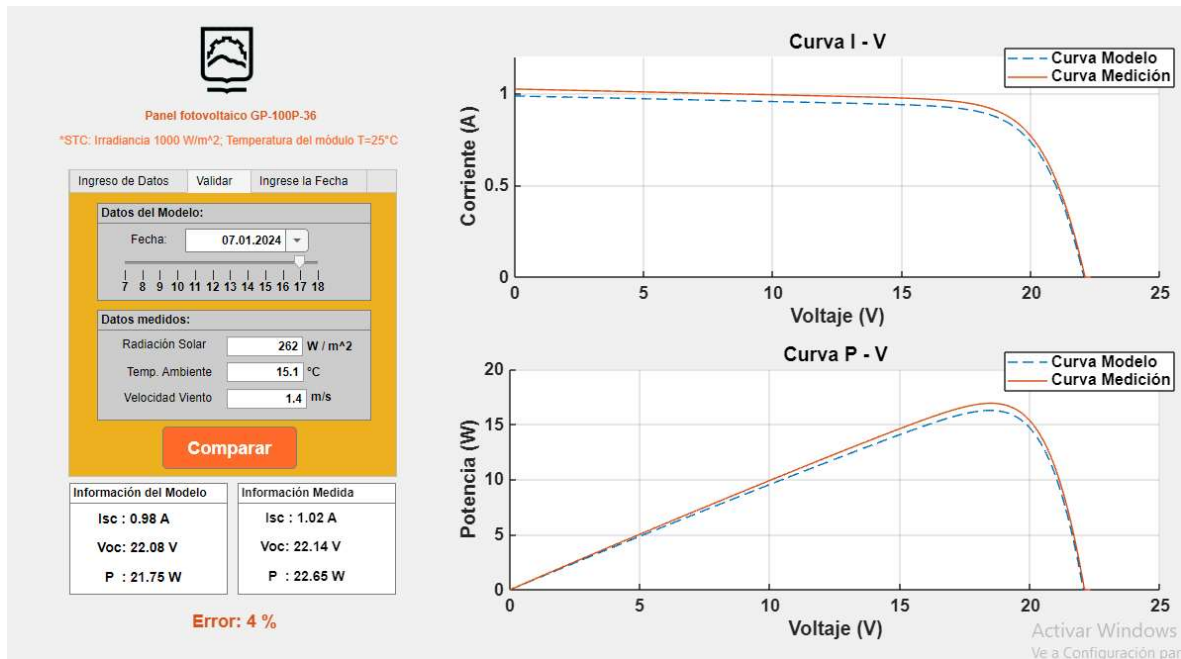


Figura 7-4: Simulación para $G= 262 \text{ W/m}^2$ y $T=15.1^\circ\text{C}$

Realizado por: Aguirre D., 2024

El modelo de generación de energía solar fotovoltaica desarrollado en MATLAB para las condiciones específicas de Riobamba muestra una aceptación significativa en sus estimaciones, consiguiendo errores entre el 2% y el 9%, cumpliendo con las condiciones establecidas para la validación del modelo se espera un RMSE < 10%, como se observa en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Error entre la I_{sc} Modelada y la I_{sc} Real

Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m^2)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	I_{sc} Modelada (A)	I_{sc} Real (A)	RMSE (%)
1/1/2024	12:00	747	19.4	3.61	3.59	2
	18:00	93	13.1	0.31	0.33	2
4/1/2024	8:00	186	15.2	0.69	0.73	4
	13:00	724	20.5	3.57	3.62	5
7/1/2024	12:00	927	19.7	4.5	4.54	4
	17:00	262	15.1	0.98	1.02	4

Realizado por: Aguirre D., 2024

Estos resultados nos permiten contar con un modelo de predicción para la corriente, el voltaje y potencia.

4.4 Predicción de la Corriente y Voltaje

Una vez que se ha completado la etapa de validación del modelo y sus resultados confirman un error dentro de los límites aceptables del 10%, se deduce que este trabajo de investigación ha logrado presentar un modelo integral, desarrollado para predecir las salidas de corriente y voltaje de los paneles fotovoltaicos, específicamente adaptado a las condiciones únicas de Riobamba, esto gracias a los avances en el modelación computacional que ha permitido predicciones más precisas sobre la generación de energía solar fotovoltaica.

Contar con un modelo de generación que permita predecir las salidas eléctricas de los paneles, facilita la optimización del diseño y operación de los sistemas fotovoltaicos asegurando así una generación energética eficiente y adaptada a las necesidades específicas del entorno de Riobamba.

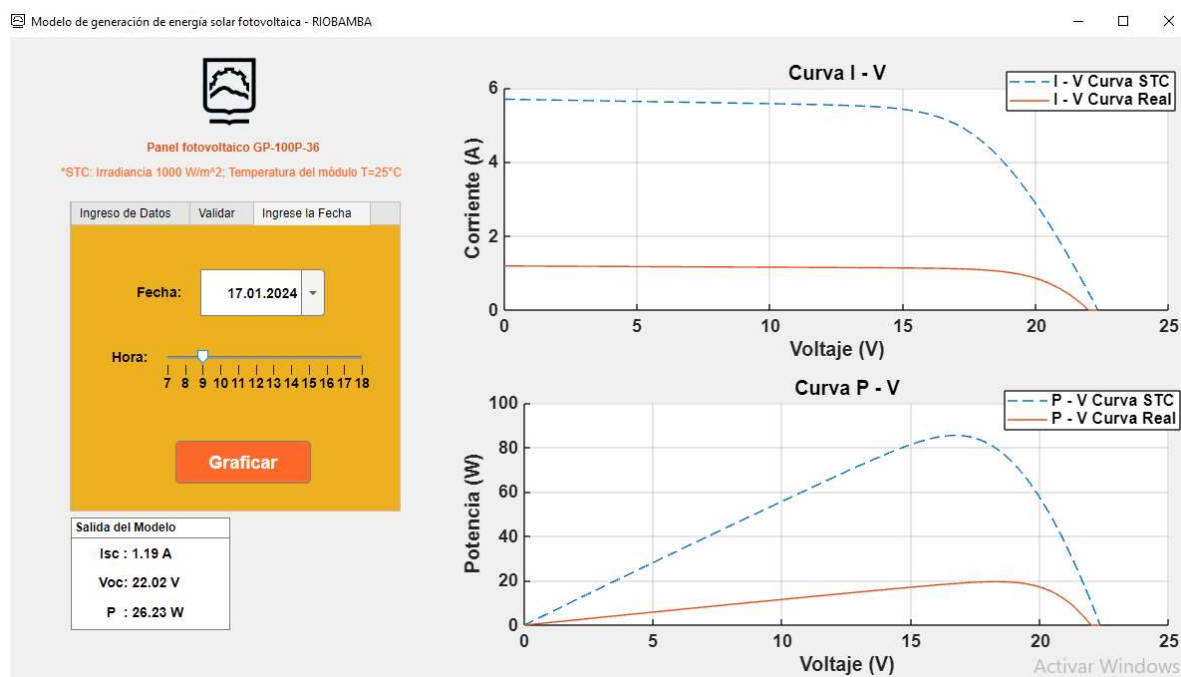


Figura 8-4: Corriente, Voltaje y Potencia para el 17 de enero de 2024 a las 9h00

Realizado por: Aguirre D., 2024

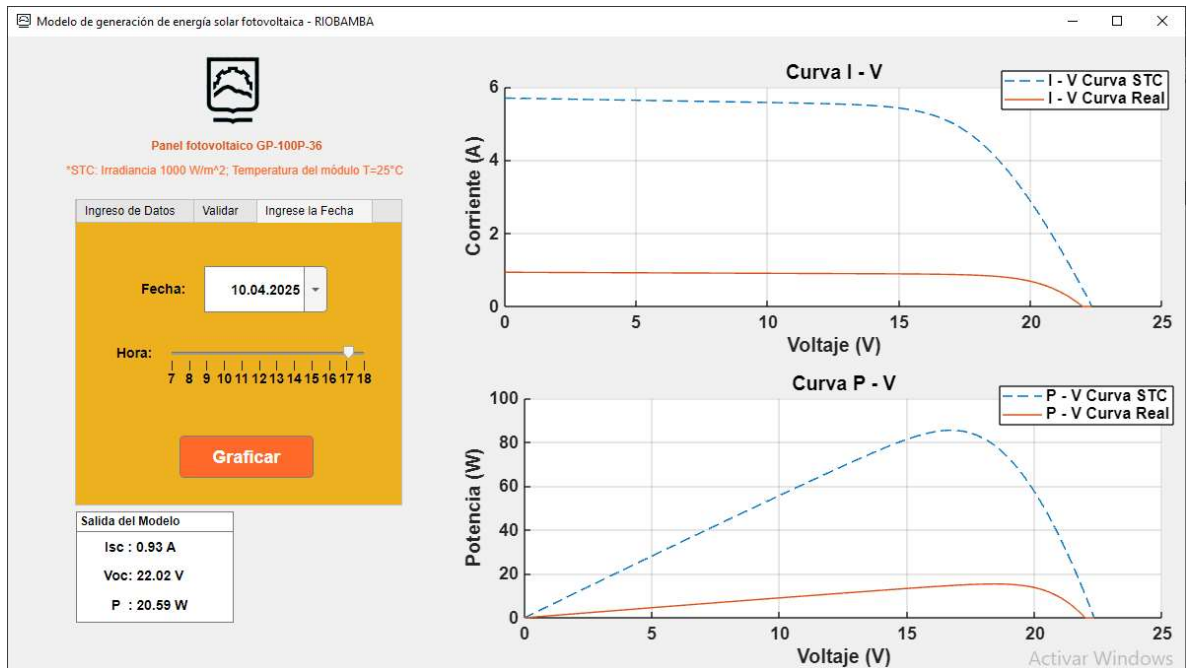


Figura 9-4: Corriente, Voltaje y Potencia para el 10 de abril de 2024 a las 17h00

Realizado por: Aguirre D., 2024

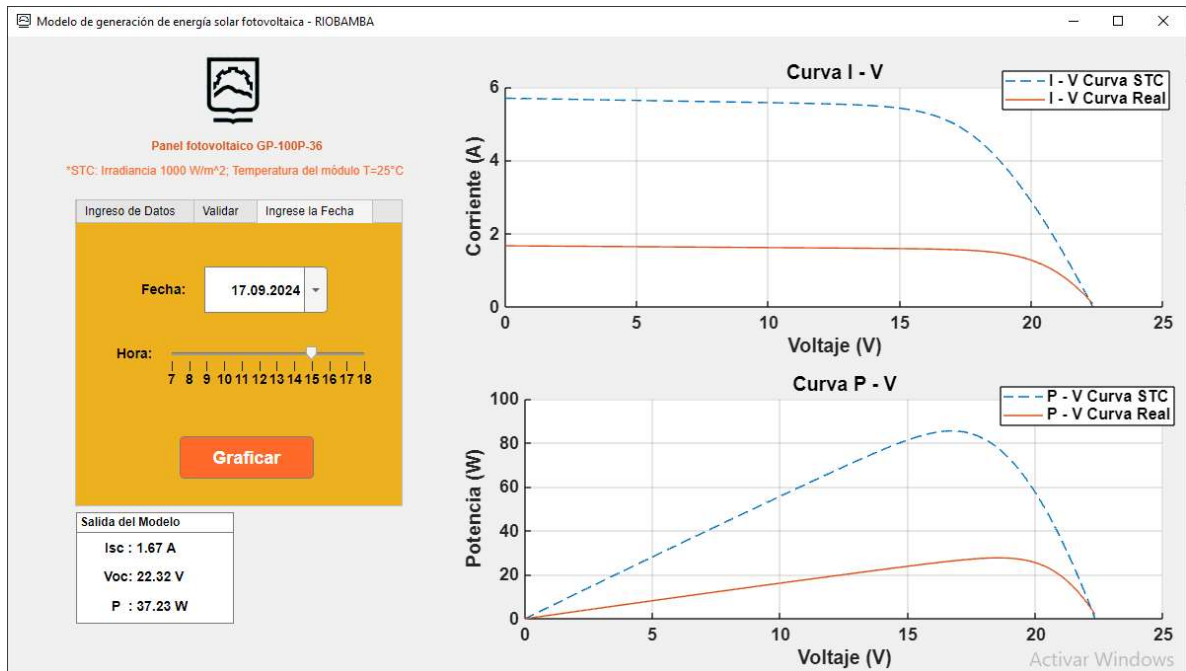


Figura 10-4: Corriente, Voltaje y Potencia para el 17 de septiembre de 2024 a las 15h00

Realizado por: Aguirre D., 2024

Las gráficas presentan un comportamiento similar a las curvas obtenidas en simulaciones realizadas con los datos de radiación y temperatura, se observa como la curva del modelo varía en función de la

hora haciendo relación a la presencia de radiación y temperatura, además que los valores de salida: corriente, voltaje y potencia, no exceda los valores máximos especificados en la ficha técnica del fabricante para el panel GP-100P-36 que se pueden observar en la Tabla 1-4.

El análisis de los datos de radiación solar y temperatura de la ciudad de Riobamba durante los años 2015 a 2022 mostró un comportamiento estable y favorable para la generación de energía fotovoltaica, con una radiación solar promedio anual de 650 W/m^2 y una temperatura promedio anual de 15°C , por lo que el modelo permite predecir con confiabilidad la corriente y voltaje de salida del panel fotovoltaico bajo las condiciones físicas y meteorológicas de Riobamba, lo cual es fundamental para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en la región.

CAPÍTULO V

5 PROPUESTA

Una vez finalizado el trabajo de investigación, se plantea la posibilidad de desarrollar un estudio integral sobre el potencial de la energía solar fotovoltaica en Riobamba, enfocado en identificar áreas óptimas para la instalación de sistemas fotovoltaicos, superando los obstáculos técnicos, económicos y regulatorios que limitan su adopción, apoyados en los resultados obtenidos en la investigación, en donde se han analizado datos físicos y meteorológicos característicos de la ciudad de la Riobamba, en donde el principal objetivo sería promover la adopción masiva de energía solar fotovoltaica contribuyendo así a la mitigación del impacto ambiental y al desarrollo sostenible de la ciudad.

Para lograr con este objetivo es necesario plantear estrategias de integración y colaboración entre instituciones públicas, privadas y comunitarias para promover la adopción de energía solar fotovoltaica en Riobamba; que siga una metodología organizada partiendo de:

- Recopilación de datos: Obtener información sobre la infraestructura urbana, las regulaciones locales y otros datos relevantes para el estudio.
- Análisis espacial: Utilizando herramientas como SIG (Sistemas de Información Geográfica) para mapear el potencial solar e identificar áreas óptimas para la instalación de sistemas fotovoltaicos.
- Evaluación económica y ambiental: Realizar análisis de costos, beneficios e impacto ambiental de la implementación de sistemas fotovoltaicos en Riobamba.
- Diseño de estrategias de implementación: Proponer recomendaciones específicas para políticas públicas, incentivos fiscales, financiamiento y programas de capacitación que fomenten la adopción de energía solar fotovoltaica en la ciudad.

5.1 Resultados Esperados

- Recopilación de datos: Obtener información sobre la infraestructura urbana, las regulaciones locales y otros datos relevantes para el estudio.
- Análisis espacial: Utilizando herramientas como SIG (Sistemas de Información Geográfica) para mapear el potencial solar e identificar áreas óptimas para la instalación de sistemas fotovoltaicos.
- Evaluación económica y ambiental: Realizar análisis de costos, beneficios e impacto ambiental de la implementación de sistemas fotovoltaicos en Riobamba.

- **Diseño de estrategias de implementación:** Proponer recomendaciones específicas para políticas públicas, incentivos fiscales, financiamiento y programas de capacitación que fomenten la adopción de energía solar fotovoltaica en la ciudad.

5.2 Impacto y Utilidad

La solución propuesta proporcionará información valiosa y herramientas prácticas para impulsar la adopción de energía solar fotovoltaica en Riobamba, lo que contribuirá a la reducción de la huella de carbono de la ciudad, la creación de empleo en el sector de las energías renovables y la mejora de la resiliencia energética frente a eventos climáticos extremos. Además, los resultados del proyecto podrían servir como modelo replicable para otras ciudades en Ecuador y en otras partes del mundo que enfrentan desafíos similares en la transición hacia una matriz energética más limpia y sostenible.

CONCLUSIONES

- La radiación solar juega un papel importante en la determinación de la temperatura ambiental, sin embargo, los datos analizados sugieren la existencia de otros factores ambientales y climáticos significativos que modulan la estabilidad de las temperaturas observadas en la ciudad de Riobamba. La presencia de un desfase temporal entre los picos de radiación y las temperaturas máximas puede ser atribuida a la capacidad térmica del entorno que retarda la conversión de radiación solar en calor, además la influencia de la geografía local, la presencia de nubes y la humedad, que pueden contribuir a una moderación de las temperaturas que no necesariamente siguen las variaciones en la radiación solar, que durante los años 2015 a 2022 mostró un comportamiento favorable para la generación de energía fotovoltaica, con una radiación solar promedio anual de 650 W/m^2 y una temperatura promedio anual de 15°C .
- El modelo presentado en esta investigación utiliza los datos proporcionados por el fabricante del panel y el histórico de los datos recolectados por la estación meteorológicas de la ESPOCH; que se incluyen en ecuaciones de correlación para predecir la producción de energía para parámetros de celda y condiciones de operación específicos, este modelo parte de la ecuación no ideal del diodo y el circuito equivalente del panel fotovoltaico y requiere de un cálculo complejo para determinar los cinco parámetros ($I_{phref}, I_{0ref}, A_{ref}, R_{sref}$ y R_{shref}) en condiciones de referencia (normalmente condiciones nominales estándar, SRC). Estos valores luego se utilizan para calcular los parámetros en condiciones operativas, lo que permite predecir la corriente, voltaje y potencia de salida.
- El modelo de generación de energía solar fotovoltaica desarrollado, logra predecir con precisión el comportamiento del panel fotovoltaico GP-100P-36, bajo diferentes condiciones de radiación solar y temperatura. La validación del modelo muestra errores que varían desde el 2 al 7% entre la corriente de cortocircuito modelada y la real, estando dentro del error permitido que corresponde al 10%, por lo que al comparar la curva real con la curva ideal del panel fotovoltaico permite identificar directamente cómo los factores ambientales locales, como la radiación solar y las diferencias de temperatura, impactan en el rendimiento del panel, esto es crucial para validar el modelo en condiciones reales y ofrecer una perspectiva real de su comportamiento energético.

RECOMENDACIONES

- Dada la complejidad y las múltiples variables que afectan la relación entre la radiación solar y la temperatura ambiental observada en la ciudad de Riobamba, se recomienda implementar un sistema integrado de monitoreo ambiental, que incluya no solo sensores para la radiación solar, la temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento, sino también para otros factores influyentes como la humedad relativa, dirección del viento y la cobertura de nubes, además este sistema debería ser capaz de recopilar datos en tiempo real y a largo plazo para permitir un análisis más detallado de las interacciones entre estos elementos.
- Como se puede observar en las ecuaciones que han permitido desarrollar el modelo, hace falta incluir variables que ayuden a optimizar el modelo de predicción, por lo que se recomienda incluir el comportamiento de la humedad relativa, la presencia de nubes, dirección del viento, y factores externos como el polvo, que influyen directa o indirectamente en la generación de energía solar fotovoltaica, con la finalidad de proporcionar modelos con mayor precisión.
- Dada la complejidad del modelo, se recomienda obtener datos meteorológicos y de rendimiento del panel solar con una alta resolución temporal y espacial para mejorar la precisión del modelo al reflejar las variaciones diarias y estacionales, para esto se podría incluir datos de diferentes fuentes, como estaciones meteorológicas locales, satélites y sensores en los paneles, que pueden ayudar a capturar un rango más amplio de variables y mejorar las estimaciones del modelo.
- Se recomienda establecer un protocolo de calibración para regular el modelo utilizando nuevos datos de entrada que permitan ajustar y afinar los parámetros del modelo conforme se disponga de nueva información, además de promover la colaboración entre meteorólogos, físicos, ingenieros eléctricos y especialistas en ciencia de datos para desarrollar un enfoque más holístico y efectivo en la modelación y gestión de sistemas fotovoltaicos.

GLOSARIO

Absorción. Proceso físico o químico en el que un material, como un líquido o un gas, se incorpora o es consumido por otro material.

Aislante. Material que impide o dificulta significativamente el flujo de corriente eléctrica debido a su muy alta resistencia eléctrica.

Bandgap. Es la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción en un material semiconductor, crucial para determinar sus propiedades electrónicas y ópticas.

Célula fotovoltaica. Dispositivo semiconductor que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

Combustibles fósiles. Fuentes de energía no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural, que cuando son quemados, liberan gases contaminantes y contribuyen al cambio climático.

Conductor. Material que permite el flujo fácil de corriente eléctrica debido a su baja resistencia eléctrica.

Corriente. Flujo de electrones u otras cargas eléctricas a través de un material conductor, medido en amperios (A).

Efecto fotovoltaico. Fenómeno por el cual se genera una corriente eléctrica en un material al exponerlo a la luz. Este efecto ocurre cuando los fotones de la luz solar inciden sobre un material semiconductor y liberan electrones, creando así una diferencia de potencial eléctrico que puede ser aprovechada para producir energía

Electrón. Partícula subatómica con carga negativa que orbita el núcleo de un átomo y participa en el enlace químico y la conducción eléctrica.

Energía [fotovoltaica]. Tecnología que convierte la luz solar directamente en electricidad utilizando células solares hechas generalmente de materiales semiconductores que exhiben el efecto fotovoltaico. Este proceso es limpio, renovable y sostenible, aprovechando la abundante energía del sol.

Energía limpia. Energía que producen pocas o ninguna emisión contaminante, contribuyendo significativamente a reducir el impacto ambiental.

Energía solar. Energía obtenida a partir de la radiación electromagnética del Sol, la cual puede ser convertida en energía térmica o eléctrica mediante el uso de diversas tecnologías como paneles solares fotovoltaicos y colectores solares térmicos.

Fotón. Partícula elemental sin masa en reposo que representa la cantidad más pequeña de luz o cualquier otro tipo de radiación electromagnética y se caracteriza por su energía y su momento.

Generación. Proceso de creación o producción de algo, como energía, datos o materiales, a partir de fuentes o procesos específicos.

Humedad. Cantidad de vapor de agua presente en el aire, representando la proporción de la saturación de humedad en un ambiente determinado.

Modelo. Representación simplificada de la realidad utilizada para explicar, predecir o controlar fenómenos o comportamientos en diversas áreas como la ciencia, economía o ingeniería.

Panel solar. Dispositivo que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas, aprovechando el efecto fotovoltaico para generar energía limpia y renovable.

Potencia. Tasa a la que se realiza el trabajo eléctrico o se transfiere energía, calculada como el producto del voltaje por la corriente, y medida en vatios (W).

Radiación. Transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas a través del espacio o un medio material.

RMSE. Error de raíz cuadrada media

Semiconductor. Material que tiene una conductividad eléctrica entre la de un conductor y la de un aislante; puede alterar sus propiedades eléctricas y ser utilizado en dispositivos electrónicos, como los transistores y las células solares.

Silicio. Elemento químico semiconductor, ampliamente utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos y células solares, debido a sus propiedades de conducción eléctrica que pueden modificarse mediante dopaje.

Temperatura. Medida de la energía térmica promedio de las partículas en un objeto o sistema, reflejando qué tan caliente o frío está.

Voltaje. Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, que impulsa el flujo de corriente eléctrica, medido en voltios (V).

BIBLIOGRAFÍA

ACHA, Carlos. “Graphical analysis of current-voltage characteristics in memristive interfaces”. *Journal of Applied Physics*, vol. 121, n°. 13, (2017), (Argentina). págs. 1-5

LUQUE, Antonio & HEGEDUS Steve. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2ª ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2011, págs. 61-63.

BARRAGÁN, Antonio; et al. “Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study”. *Energy Strategy Reviews* [en línea], 2022, (Países Bajos), vol. 43, págs. 2-3. [Consulta: 10 enero 2024]. ISSN. 2211-467X1. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22000979>.

CABRERA, C. & POMA, M., 2015. “Propiedades electrónicas del germanio (Ge) y de los compuestos binarios de galio-fósforo (GaP) y de silicio-carbón (SiC)” *Revista Peruana de Química e Ingeniería. Química*, vol. 18, n° 1, (2015), (Perú). págs. 9-15.

CARBONELL, Marcos. *¿Qué es la radiación solar directa e indirecta? Placas Solares* [blog]. España: Hogarsense, 2023. [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/radiacion-solar-directa-e-indirecta#clases>.

CHAIBI, Y. “A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel”. *Solar Energy*, vol. 163, (2018), (Reino Unido). págs. 376-386.

CLARK, D. “A method for estimating the performance of photovoltaic systems”. *Solar Energy*, vol. 33, n°. 6, (1984), (Reino Unido). págs. 551-555

CORDERO, Raúl. *¿Qué Tipos de Paneles Solares existen y para qué se usan?* [blog]. España: SUNFIELDS Europe, 2024. [Consulta 03 enero 2024]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-placas-solares/>

CUENCA, Alan; et al. “Design Methodology of Off-Grid PV Solar Powered Systems for Rural Areas in Ecuador”. *Revista Técnica «energía»* [en línea], 2023, (Ecuador), vol. 20 (1), págs. 43-51.

[Consulta: 03 enero 2024]. ISSN 2602-8492. Disponible en: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.537>

DUFFIE, Jhon; et al. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, 5^a. ed. New Jersey-Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2020. ISBN: 9781119540311, págs. 760-788.

GADM - RIOBAMBA, 2020. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2020-2023*. [blog]. Riobamba: 2021. [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.gadmriobamba.gob.ec/index.php/ordenamiento-territorial/plan-pdyot-2020-2030>.

GARCÍA, Antonio. “Construcción de significados de física de semiconductores en educación secundaria: fundamentos y resultados de una investigación”. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [en línea], 2006, (Brasil), vol. 28 (4), pág. 509 [Consulta: 25 febrero 2024]. ISSN 1806-9126. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172006000400013>

GI-POWER NEW ENERGY. *100W-110W Polycrystalline Solar Module*. China, 2023. [en línea]. [Consulta: 18 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.renova-energia.com/productos/polycrystallinemodulemodelsgp-100p-36/>

HAHN, Giso. “Silicon PV 2022, the 12th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 262, (2023), (Países Bajos). pág. 376.

HOLMES, Andrew & FLETCHER, Neville. *From sunlight to electricity*. [blog]. Australia: *Technology & the future*, 2024. [Consulta: 18 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/solar-pv>

IDEAM. *Características de la Radiación Solar*. [blog]. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024. [Consulta: 24 febrero 2024]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>

JUTGLAR BANYERAS, Luis. *Energía solar*. Barcelona-España: Grupo Editorial CEAC, 2004. ISBN 13: 9788422910630, págs. 187 – 195.

KABIR, Ehsanul; et al. “Solar energy: Potential and future prospects”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2018, (Reino Unido), vol. 82 (1), págs. 894-900. [Consulta: 03 enero 2024] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>

KUCKARTZ, Stefan; et al. *Statistik: Eine verständliche Einführung*. 2^{da} ed. Alemania: Springer, 2013. pág. 97.

LEÑERO BARBALLO, Juan. *Fundamentos de la electrónica y los semiconductores*. España: Editorial UCA, 2022, págs. 15-22

MANWELL, J.F. 2004. *Hybrid Energy Systems* [en línea]. New York-Estados Unidos: Elsevier, 2004. [Consulta: 03 enero 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00360-0>

MARTE, Tomas. Tecnologías de información y comunicaciones. *El espectro electromagnético* [blog]. República Dominicana: Burburaca, 2020. [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.tomasmarte.com/2020/07/03/el-espectro-electromagnetico/>

MIKATI, M.; et al. “Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* [en línea], 2012, vol. 9 (3), págs. 267-281. [Consulta: 25 febrero 2024]. ISSN 1697-7912. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>

MOHAMMED, S.; et al. “Assessment of PV Modules Degradation based on Performances and Visual Inspection in Algerian Sahara”. *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, n° 1, (2016), (Países Bajos). págs. 106-116

MUÑOZ VIZHÑAY, Jorge; et al. “Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador”. *Ingenius*, n° 19, (2018), (Ecuador), págs. 60-66

¿+}

NATIONAL GEOGRAPHIC. 2010. *Energía Solar* [blog]. Estados Unidos: Nat Geo, 2012. [Consulta: 28 abril 2024]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-solar>

NELSON, Jenny. *The Physics of Solar Cells*. Reino Unido: World Scientific Publishing Company, 2003, ISBN: 978-1-86094-340-9, págs. 121-126

PILIOUGINE, Michel; et al. “Comparative of IEC 60891 and Other Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I–V Characteristics of Photovoltaic Devices”. *Energies*, vol. 17, n° 3, (2024), (Suiza). págs. 566

REPSOL. *Semiconductores: qué son, materiales y tipos*. [blog]. España: Repsol, 2023. [consulta: 27 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/semiconductores/index.cshtml>

RUIZ, Fernando; et al. 2023. “El espectro electromagnético. Los efectos de la radiación no ionizante y cómo prevenirlos”. *Revista Avance y Perspectivas* [en línea], 2023, (México), vol. 8 (4), [Consulta en: 27 marzo 2024]. Disponible en: <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/el-espectro-electromagnetico-los-efectos-de-la-radiacion-no-ionizante-y-como-prevenirlos/>

SADOK, Mohammed & MEHDAOUI, Ahmed. 2008. “Outdoor testing of photovoltaic arrays in the Saharan región”. *Renewable Energy*, vol. 33, n° 12, (2008), (Reino Unido). págs. 2516-2524

SAMUDRAPON, Dam. 2023. AZO materials. *What is the role of the depletion region in a semiconductor pn junction?* [blog]. Reino Unido: AZO Materials, 2023, [Consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=22739>

ŞENTÜRK, Ali. 2024. “A new recursive method based on datasheet information to calculate the double diode model parameters of commercially available photovoltaic modules”. *Renewable Energy*, vol. 227, (2024) (Reino Unido). págs. 17-18

SINGLA, Parpeed; et al. “10 - Different normalization techniques as data preprocessing for one step ahead forecasting of solar global horizontal irradiance”. *Artificial Intelligence for Renewable Energy Systems* [en línea], 2022a, (Reino Unido), págs. 209-230. [Consulta: 03 de marzo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90396-7.00004-3>

SINGLA, Parpeed; et al. “10 - Different normalization techniques as data preprocessing for one step ahead forecasting of solar global horizontal irradiance”. *Artificial Intelligence for Renewable*

Energy Systems [en línea], 2022b, (Reino Unido), págs. 209-230. [Consulta: 03 de marzo 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90396-7.00004-3>

SOLAR INC. 2021. Solar Inc Monterrey. *¿Qué es y cómo funciona un panel solar?* [blog]. Monterrey, 2021. [Consulta: 11 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.energiasolarinc.com>

SOLARGIS. *Datos meteorológicos y software para invertir en energía solar. Mapas de recursos solares del Ecuador* [blog]. Eslovaquia: World Bank, Solar resource data: Solargis, 2024. [Consulta: 31 marzo 2024]. Disponible en: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/ecuador>

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2002. *Solar Radiation Basics*. [blog]. Washington-Estados Unidos: Energy.gov, 2002. [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics>

BOGDAN, Doreen. “El futuro del tiempo universal coordinado”. *ITU News Magazine* [en línea], 2023, (Suiza), vol 1 (2), págs. 3-57. [Consulta: 25 febrero 2024]. ISSN: 1020-4148. Disponible en: <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx#gsc.tab=0>

VARGAS, Tatiana & ABRAHAMSE, Augusta. 2014. “An open-source hardware I-V curve tracer for monitoring pv output in Bolivia”. *Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 14, (2014), (Bolivia). págs. 100-116

WORLD TIME SERVER, 2024. “Ecuador Time Zone - ECT. Times Zones” [blog]. Estados Unidos: timeanddate, 2024. [Consulta: 27 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.timeanddate.com/>

ZEKAI, Sen. 2008. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. London: Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-133-6, págs. 1-20

ZHANG, T. & WANG, R. 2019. “High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems”. En: F. ASDRUBALI Francesco. & DESIDERI Umberto (eds.), *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*, vol. 1, Chapter 7. (2019), (Reino Unido). págs. 441-595

ANEXOS

ANEXO A: FICHA TÉCNICA DEL PANEL FOTOVOLTAICO GP-100P-36



Polycrystalline Module Models

GP-110P-36 GP-105P-36 GP-100P-36

Electrical Specifications

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Model type	GP-110P-36	GP-105P-36	GP-100P-36
Peak power (Pmax)	110W	105W	100W
Cell Efficiency	18.83%	18.52%	17.64%
Maximum power voltage (Vmp)	19.5V	19.2V	18.7V
Maximum power current (Imp)	5.64A	5.47A	5.35A
Open circuit voltage (Voc)	23.0V	22.6V	22.3V
Short circuit current (Isc)	5.97A	5.82A	5.69A
Power Tolerance		±3%	
Maximum system voltage		800V	
Series fuse rating (A)		8	
Number of bypass diode		2	

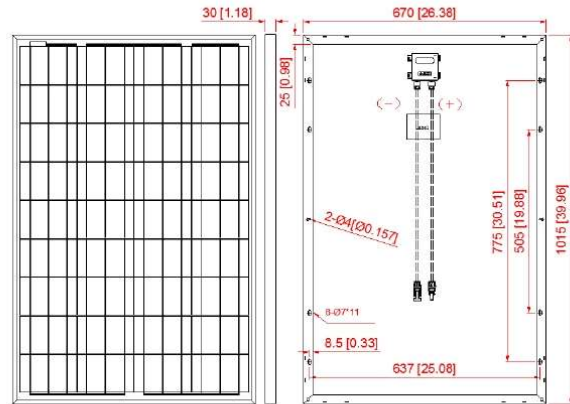


Temperature Coefficients

Current Temperature Coefficient $\alpha(I_{sc})$	0.08%/°C
Voltage Temperature Coefficient $\beta(V_{oc})$	-0.32%/°C
Power Temperature Coefficient	-0.38%/°C
Nominal Temperature Of Cells(NOTC)	46±2°C
Application Temperature Range	-40~+85°C

Mechanical Characteristics

Dimensions:	1015 x 670 x 30mm (39.96x26.38x1.18 inch)
Weight:	7.2 kg (15.98 lbs)
Solar Cells:	36 cells in series(4 x 9)
Construction:	High-transmission low-iron tempered glass , EVA, TPT/TPE
Frame:	Anodized aluminum is mainly for improving corrosion resistance. Color: silver



Module Diagram

Output(Optional)

Cable	LAPP(4 mm ²)
Lengths	900mm(-) and 900mm(+)
Connector	MC Plug Type IV

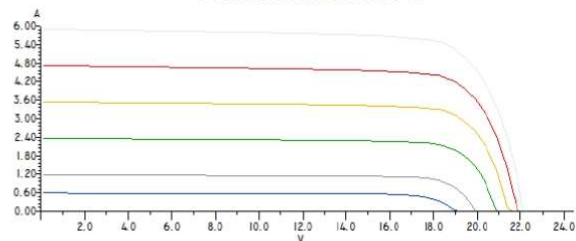
Module Warranty:

- 25-year limited warranty of 80% power output;
- 10-year limited warranty of 90% power output;
- 5-year limited warranty of materials and workmanship.

Note: This publication summarizes product warranty and Specifications which are subject to change without notice

Product photos are for reference only, on behalf of actual product.

U-I-CHARACTERISTIC CURVE AT 25 °C



— U-I-CHARACTERISTIC CURVE 100 W/m² — U-I-CHARACTERISTIC CURVE 200 W/m²
— U-I-CHARACTERISTIC CURVE 400 W/m² — U-I-CHARACTERISTIC CURVE 600 W/m²
— U-I-CHARACTERISTIC CURVE 800 W/m² — U-I-CHARACTERISTIC CURVE 1000 W/m²

Electrical Performance

ANEXO B: CÓDIGO EN MATLAB PARA EL MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA BAJO CONDICIONES FÍSICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA

```
%% Modelo de curva I-V celda solar con STC y parámetros reales de Riobamba

% Marca : Gi-Power
% Modelo: GP-100P-36
% Maximun Power Voltaje(Vmp): 18.7V
% Maximun Power Current(Imp): 3.35A
% Open Circuit Voltage(Voc) : 22.3V
% Short Circuit Current(Isc): 5.69A
% Current Temperature Coefficient  $\alpha$ (Isc): 0.08%/°C
% Voltage Temperature Coefficient  $\beta$ (Voc): -0.32%/°C
%% Solar Cells: 36 cells in siries(4x9)

clc
clear
close all

%% Parámetros reales
Tc = 30;           % Temperatura en Grados centígrados del panel
G = 1000;         % Radiación incidente en Watts/metro cuadrado en el panel
T = Tc + 273.15; % Cambio de Temperatura a Centígrados a Kelvin
%% Parámetros STC
Tref=273.15+25;  % 25°C STC
Gref=1000;       % Irradiación en el panel STC

%% Características Térmicas
alpha = 0.002594; % A/°K % Factor o Coeficiente Térmico de Corriente, es la
pendiente de la gráfica I vs T (A vs grado C)
beta = -0.02602 ; % V/°K % Factor o Coeficiente Térmico de Voltaje, es la
pendiente de la gráfica V vs T (V vs grado C)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Eg=1.14;         % Energía de la banda prohibida en electrón/volt (Se usa:
Semiconductor de Silicio)
Ns=1;           % Número de celdas en serie
% Ns=36;
Ipvref=0.1;    % Corriente Fotovoltaica de referencia
Rs0=1;         % Resistencia en serie
Rsh0=100;      % Resistencia en paralelo

%% Valores obtenidos del Fabricante o en su defecto de una curva experimental.
Imref=0.0743;  % 0.1486;
Vmref=0.2597;  % 0.5194;
Iscref=0.07905; % 0.1581;
Vocref=0.372;  % 0.6194;

Vd=0:1e-3:0.5; % Vector de Voltaje
s=size(Vd);     % tamaño del vector de voltaje
I=Ipvref;       %

%% Parámetros TSC Ec (19), (20), (21), (22), (23)
```

```

Rshref=Rsh0; % Ec(22)
Aref=(Vmref+Imref*Rs0-Vocref)/(log(Iscref-(Vmref/Rshref)-Imref)-...
    log(Iscref-Vocref/Rshref)+(Imref/(Iscref-Vocref/Rshref))); % Ec(19)
I0ref=(Iscref-Vocref/Rshref)*exp(-Vocref/Aref); % Ec(20)
Rsref=Rs0-(Aref/I0ref)*exp(-Vocref/Aref); % Ec(21)

%% Parámetros REAL Ec (24), (25), (26), (27), (28), (29), (30)
A=Aref*(T/Tref); % Ec (24) Factor de Idealidad Modificado
I0=I0ref*((T/Tref)^3)*exp((Eg*Ns/Aref)*(1-Tref/T)); % Ec (25) Corriente de
saturación en inversa del Diodo
Ipv=(G/Gref)*(Ipvref+alpha*(T-Tref)); % Ec (26) Fotocorriente
Rs=Rsref; % Ec (27)
Rsh=Rshref*(Gref/G); % Ec (28)
Isc=Iscref*(G/Gref); % Ec (29)
Voc=Vocref-beta*(Tref-T); % Ec (30)

%% Newton Rapson - método iterativo
for n=1:s(2) % para Voltajes del sistema
    for i=1:10 % para valores del sistema
        Id1 = Ipvref-I0ref*exp((Vd(n)+I(i)*Rsref)/Aref)-
            ((Vd(n)+I(i)*Rsref)/Rshref)-I(i);
        dId1 = 0-(Rsref/Aref)*I0ref*exp((Vd(n)+I(i)*Rsref)/Aref)-(Rsref/Rshref)-
            1; %%% derivada
        I(i+1)=I(i)-Id1/dId1;
    end
    Id(n)=I(end);
end

I=Ipvref;
% n=0;
i=0;

for n=1:s(2)
    for i=1:10
        Id1 = Ipv-I0*exp((Vd(n)+I(i)*Rs)/A)-((Vd(n)+I(i)*Rs)/Rsh)-I(i);
        dId1 = 0-(Rs/A)*I0*exp((Vd(n)+I(i)*Rs)/A)-(Rs/Rsh)-1;
        I(i+1)=I(i)-Id1/dId1;
    end
    Id2(n)=I(end);
end

[valt,post]=min(sqrt(Id.*Id));
Id=Id(1:post);
Vd=Vd(1:post);
Id2=Id2(1:post);

%% Cálculo de Potencia
P=Vd.*Id;
P2=Vd.*Id2;

plot(Vd,Id,'--',Vd,Id2,Vd,P,'--',Vd,P2)

[val, pos]=max(P);

Imax=Id(pos);

```

```

Vmax=Vd(pos);
Pmax=P(pos);

%% Cálculo de Pendientes de Resistencias STC
slope1I=[Id(1) Id(150)];
slope1V=[Vd(1) Vd(150)];

slope2I=[Id(end-80) Id(end)];
slope2V=[Vd(end-80) Vd(end)];

slope3I=[0 Imax];
slope3V=[0 Vmax];

hold on

plot(slope1V,slope1I,'lineWidth',2) % Grafica Rsh
plot(slope2V,slope2I,'lineWidth',2) % Grafica Rs
plot(slope3V,slope3I,'lineWidth',2) % Grafica RL

grid on

%% Cálculo de valores de cada Resistencia
Rshc=-1/((slope1I(2)-slope1I(1))/(slope1V(2)-slope1V(1)));
Rsc=-1/((slope2I(2)-slope2I(1))/(slope2V(2)-slope2V(1)));
RLc=1/((slope3I(2)-slope3I(1))/(slope3V(2)-slope3V(1)));

title('Curva I - V Celda Solar')
xlabel('Voltaje')
ylabel('Corriente / Potencia')
legend('I - V Curva STC','I - V Curva Real','Potencia STC','Potencia real',...
       ['Rsh= ' num2str(Rshc) ' Ohms'],...
       ['Rs= ' num2str(Rsc) ' Ohms'],...
       ['RL= ' num2str(RLc) ' Ohms'])

```

----- LECTURA DE LOS DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICAS -----

```

%% Captura de datos desde Excel
clear
clc
datos=xlsread("Data_AVG_anual_15-22.xlsx");
[m,n]=size(datos);
fecha=datos(3,8);
a=matlab.datetime.compatibility.convertDatenum(fecha);

```

ANEXO C: INTERFAZ DE USUARIO EN MATLAB



Panel fotovoltaico GP-100P-36
*STC: Irradiancia 1000 W/m²; Temperatura del módulo T=25°C

Ingreso de Datos Validar Ingrese la Fecha

Radiación Solar W / m²

Temp. Ambiente °C

Velocidad Viento m/s

Panel fotovoltaico GP-100P-36
*STC: Irradiancia 1000 W/m²; Temperatura del módulo T=25°C

Ingreso de Datos Validar Ingrese la Fecha

Datos del Modelo:

Fecha:

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Datos medidos:

Radiación Solar W / m²

Temp. Ambiente °C

Velocidad Viento m/s

Panel fotovoltaico GP-100P-36
*STC: Irradiancia 1000 W/m²; Temperatura del módulo T=25°C

Ingreso de Datos Validar Ingrese la Fecha

Fecha:

Hora: 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

ANEXO D: DATOS DE SALIDA DEL PANEL FOTOVOLTAICO Y LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PARA LA SEMANA DEL 01 AL 07 DE ENERO DE 2024

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
1/1/2024	0:00	0	11,0	0	0	0,00	0
	1:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	2:00	0	10,5	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,4	0	0	0,00	0
	4:00	0	10,2	0	0	0,00	0
	5:00	0	10,3	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,5	0	0	0,00	0
	7:00	20	12,5	0,07	19,8	1,39	2
	8:00	115	14,0	0,42	21,42	9,00	3
	9:00	304	16,3	1,24	22,14	27,45	2
	10:00	591	18,1	2,67	22,32	59,59	3
	11:00	605	18,7	2,84	22,32	63,39	3
	12:00	747	19,4	3,53	22,32	78,79	7
	13:00	740	19,3	3,5	22,32	78,12	4
	14:00	813	18,2	3,74	22,32	83,48	7
	15:00	610	18,1	2,77	22,32	61,83	5
	16:00	339	17,3	1,52	22,14	33,65	4
	17:00	235	15,4	0,93	21,96	20,42	4
	18:00	98	13,1	0,34	21,36	7,26	3
	19:00	4	13,5	0	0	0,00	0
	20:00	0	12,8	0	0	0,00	0
21:00	0	12,3	0	0	0,00	0	
22:00	0	11,9	0	0	0,00	0	
23:00	0	11,5	0	0	0,00	0	
2/1/2024	0:00	0	11,0	0	0	0,00	0
	1:00	0	10,8	0	0	0,00	0

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
	2:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,7	0	0	0,00	0
	4:00	0	10,7	0	0	0,00	0
	5:00	0	10,9	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,5	0	0	0,00	0
	7:00	62	12,5	0,21	20,94	4,40	9
	8:00	139	14,1	0,51	21,6	11,02	3
	9:00	287	15,5	1,14	22,14	25,24	7
	10:00	472	16,7	2	22,32	44,64	4
	11:00	541	18,1	2,45	22,32	54,68	4
	12:00	767	18,5	3,56	22,32	79,46	4
	13:00	852	18,8	4,02	22,32	89,73	4
	14:00	802	18,3	3,7	22,32	82,58	4
	15:00	536	17,6	2,37	22,32	52,90	4
	16:00	332	16,3	1,38	22,2	30,64	4
	17:00	247	15,1	0,96	22,08	21,20	4
	18:00	78	13,8	0,28	21	5,88	3
	19:00	3	13,0	0	0	0,00	0
	20:00	0	12,2	0	0	0,00	0
	21:00	0	11,7	0	0	0,00	0
	22:00	0	11,1	0	0	0,00	0
	23:00	0	10,6	0	0	0,00	0
3/1/2024	0:00	0	10,7	0	0	0,00	0
	1:00	0	10,5	0	0	0,00	0
	2:00	0	10,3	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,4	0	0	0,00	0
	4:00	0	10,3	0	0	0,00	0
	5:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,5	0	0	0,00	0

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
	7:00	32	12,9	0,11	20,22	2,22	3
	8:00	160	14,6	0,61	21,66	13,21	4
	9:00	330	16,3	1,37	22,2	30,41	4
	10:00	575	18,1	2,6	22,32	58,03	4
	11:00	732	19,5	3,53	22,32	78,79	4
	12:00	811	20,2	4,03	22,32	89,95	5
	13:00	935	20,3	4,68	22,32	104,46	4
	14:00	864	20,1	4,28	22,32	95,53	5
	15:00	710	18,8	3,33	22,32	74,33	4
	16:00	523	16,8	2,24	22,32	50,00	4
	17:00	275	15,2	1,08	22,14	23,91	4
	18:00	72	14,0	0,26	20,94	5,44	3
	19:00	2	13,1	0	0	0,00	0
	20:00	0	12,2	0	0	0,00	0
	21:00	0	11,5	0	0	0,00	0
	22:00	0	11,1	0	0	0,00	0
	23:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	4/1/2024	0:00	0	10,6	0	0	0,00
1:00		0	10,2	0	0	0,00	0
2:00		0	10,1	0	0	0,00	0
3:00		0	9,9	0	0	0,00	0
4:00		0	9,8	0	0	0,00	0
5:00		0	10,2	0	0	0,00	0
6:00		0	11,5	0	0	0,00	0
7:00		44	13,3	0,15	20,46	3,07	3
8:00		186	15,2	0,73	21,78	15,90	4
9:00		388	17,0	1,66	22,32	37,05	5
10:00		509	18,7	2,35	22,32	52,45	5
11:00	653	20,1	3,21	22,32	71,65	5	

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
	12:00	808	20,3	4,03	22,32	89,95	5
	13:00	724	20,5	3,62	22,32	80,80	5
	14:00	615	19,7	2,97	22,32	66,29	4
	15:00	636	18,3	2,91	22,32	64,95	5
	16:00	476	16,5	2	22,32	44,64	4
	17:00	207	15,2	0,81	21,84	17,69	4
	18:00	46	14,1	0,17	20,46	3,48	3
	19:00	3	13,2	0	0	0,00	0
	20:00	0	12,7	0	0	0,00	0
	21:00	0	12,2	0	0	0,00	0
	22:00	0	11,9	0	0	0,00	0
5/1/2024	23:00	0	11,6	0	0	0,00	0
	0:00	0	11,5	0	0	0,00	0
	1:00	0	11,2	0	0	0,00	0
	2:00	0	10,9	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,3	0	0	0,00	0
	4:00	0	10,1	0	0	0,00	0
	5:00	0	10,4	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,8	0	0	0,00	0
	7:00	40	14,0	0,15	20,28	3,04	3
	8:00	155	16,0	0,63	21,48	13,53	4
	9:00	399	17,8	1,77	22,2	39,29	4
	10:00	661	19,3	3,15	22,32	70,31	4
	11:00	781	19,9	3,83	22,32	85,49	5
	12:00	872	20,2	4,34	22,32	96,87	5
13:00	878	19,4	4,24	22,32	94,64	4	
14:00	644	18,3	2,95	22,32	65,84	4	
15:00	575	16,2	2,4	22,32	53,57	3	
16:00	458	15,7	1,86	22,32	41,52	4	

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
	17:00	181	14,1	0,67	21,84	14,63	4
	18:00	67	13,7	0,24	20,88	5,01	4
	19:00	3	13,1	0	0	0,00	0
	20:00	0	12,5	0	0	0,00	0
	21:00	0	12,1	0	0	0,00	0
	22:00	0	11,5	0	0	0,00	0
	23:00	0	11,3	0	0	0,00	0
6/1/2024	0:00	0	11,0	0	0	0,00	0
	1:00	0	10,8	0	0	0,00	0
	2:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,2	0	0	0,00	0
	4:00	0	9,8	0	0	0,00	0
	5:00	0	9,8	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,4	0	0	0,00	0
	7:00	41	12,9	0,14	20,46	2,86	3
	8:00	195	14,8	0,75	21,84	16,38	4
	9:00	338	16,7	1,43	22,2	31,75	4
	10:00	596	18,2	2,71	22,32	60,49	5
	11:00	815	19,5	3,94	22,32	87,94	5
	12:00	832	20,0	4,1	22,32	91,51	5
	13:00	868	19,6	4,22	22,32	94,19	4
	14:00	746	18,6	3,47	22,32	77,45	4
	15:00	629	13,8	2,35	22,32	52,45	3
	16:00	391	15,4	1,56	22,32	34,82	4
	17:00	154	14,0	0,57	21,72	12,38	4
	18:00	65	12,9	0,22	20,94	4,61	3
19:00	0	12,2	0	0	0,00	0	
20:00	0	11,8	0	0	0,00	0	
21:00	0	11,3	0	0	0,00	0	

Fecha	Hora	Datos de la estación meteorológica		Datos de Salida del PV			RMSE %
		Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura (°C)	Isc Real (A)	Voc Real (V)	P Real (kW)	
	22:00	0	11,0	0	0	0,00	0
	23:00	0	11,1	0	0	0,00	0
7/1/2024	0:00	0	11,0	0	0	0,00	0
	1:00	0	10,9	0	0	0,00	0
	2:00	0	10,6	0	0	0,00	0
	3:00	0	10,2	0	0	0,00	0
	4:00	0	10,0	0	0	0,00	0
	5:00	0	9,9	0	0	0,00	0
	6:00	0	11,4	0	0	0,00	0
	7:00	45	13,3	0,16	20,52	3,28	3
	8:00	180	15,0	0,7	21,72	15,20	4
	9:00	376	17,0	1,61	22,26	35,84	4
	10:00	579	18,5	2,67	22,32	59,59	4
	11:00	720	19,8	3,51	22,32	78,34	4
	12:00	927	19,7	4,54	22,32	101,33	4
	13:00	897	19,9	4,42	22,32	98,65	4
	14:00	791	20,0	3,9	22,32	87,05	4
	15:00	669	19,0	3,15	22,32	70,31	5
	16:00	581	17,3	2,54	22,32	56,69	4
	17:00	262	15,1	1,02	22,14	22,58	4
	18:00	63	13,7	0,23	20,82	4,79	3
	19:00	0	12,8	0	0	0,00	0
20:00	0	12,2	0	0	0,00	0	
21:00	0	11,7	0	0	0,00	0	
22:00	0	10,9	0	0	0,00	0	
23:00	0	10,5	0	0	0,00	0	