



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-  
FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRICIDAD.**

#### **AUTORES:**

Diego Sebastián Farez Chuquitarco

Erik Fabian Chicaiza Cando

#### **TUTOR:**

Ing. M.Sc. Jiménez Jiménez Diego Leonardo

**LATACUNGA, AGOSTO 2024**



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **FAREZ CHUQUITARCO DIEGO SEBASTIÁN Y CHICAIZA CANDO ERIK FABIAN** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO”**, siendo el Ing. MSc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos el presente proyecto investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Farez Chuquitarco Diego Sebastián  
C.C. 0550645642

Chicaiza Cando Erik Fabian  
C.C. 0550040349



## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO”**, de **FAREZ CHUQUITARCO DIEGO SEBASTIÁN Y CHICAIZA CANDO ERIK FABIAN**, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 19 agosto, 2024

.....  
Ing. MSc. Jiménez Jiménez Diego Leonardo

CC: 0503493702



## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente proyecto de investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **DIEGO SEBASTIAN FAREZ CHUQUITARCO Y CHICAIZA CANDO ERIK FABIAN** con el título de Proyecto de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto, 2024

Para constancia firman:

Lector 1

Ing. Salazar Achig Edgar Roberto

CC: 0502847619

Lector 2

Ing. León Segovia Marco

CC: 0502305402

Lector 3

Ing. León Segovia Manuel Ángel

CC: 0502041353

## **AGRADECIMIENTOS**

*Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarnos la oportunidad de formarnos en sus aulas y prepararnos como excelentes profesionales. Su compromiso con la excelencia académica ha sido fundamental para nuestro desarrollo.*

*De igual manera, extendemos nuestro enorme y sincero agradecimiento al Ing. MSc Diego Jiménez, por el apoyo brindado e importantes conocimientos compartidos, además de la paciencia puesta en el desarrollo de esta tesis investigativa.*

*A los docentes que nos acompañaron a lo largo de este camino, queremos expresar nuestro más sincero y profundo agradecimiento. Los conocimientos que han compartido con nosotros no solo han enriquecido nuestra formación académica, sino que también han dejado una huella imborrable en nuestro desarrollo personal y profesional. Cada clase impartida, cada consejo y cada momento de apoyo nos hace sentir muy agradecidos por haber tenido el privilegio de aprender de los grandiosos docentes que tiene la Universidad Técnica de Cotopaxi y en especial la carrera de Ingeniería en Electricidad, y llevamos con orgullo el conocimiento y las enseñanzas que tan generosamente nos han brindado.*

**Los Autores**

## **DEDICATORIA**

*Quiero dedicar este trabajo a Dios, quien me ha dado la sabiduría, inteligencia y la fortaleza necesaria para llevar a cabo esta tesis investigativa. Agradezco a mis padres Omar Farez y Maricela Chuquitarco por su apoyo incondicional durante mi etapa académica. También dedico este logro a toda mi familia, por confiar en mí, por aconsejarme, motivarme y darme ánimos en todo momento.*

***Farez Sebastián***

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo dedico a mi madre Olga, que gracias a su apoyo incondicional y a sus sabios consejo, he logrado ser la persona que soy, luchar por cada objetivo que me plantee. Ella es un ejemplo de perseverancia, de nunca rendirme ante cualesquiera adversidades que se presente en el camino.*

*A mi hermano Cristian que estuvo pendiente de mi progreso en mi carrera universitario y apoyándose incondicionalmente en todo momento, para así salir adelante juntos y hacerle sentir orgullosa nuestra madre.*

*A mi tía Mercedes que pese a la distancia estuvo siempre pendiente de mí y estuvo apoyándose en todas mis decisiones.*

*A mis familiares que desde el cielo me guiaron con su bendición y cuidado.*

*A todos mis familiares que estuvieron pendientes de mí y a las personas especiales que fueron apoyo y motivación incondicional en los momentos muy difíciles de este proceso de investigación.*

**Chicaiza Erik**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2	INTRODUCCIÓN .....	2
2.1	Situación Problemática .....	3
2.2	Formulación del Problema.....	3
2.3	Objeto y campo de acción .....	4
2.3.1	Objeto de Investigación .....	4
2.3.2	Campo de acción .....	4
2.4	Beneficiarios .....	4
2.4.1	Directo .....	4
2.4.2	Indirecto.....	4
2.5	Justificación .....	4
2.6	Objetivos.....	5
2.6.1	General.....	5
2.6.2	Específicos.....	5
2.7	Sistema de actividades.....	5
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
3.1	Antecedentes de la investigación.....	8
3.2	Energía renovable .....	9
3.3	Energía renovable no convencional (ERNC) .....	10
3.4	Energía Solar .....	10
3.4.1	Energía solar térmica .....	10
3.4.2	Energía solar fotovoltaica.....	11
3.4.3	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos .....	11
3.4.4	Radiación solar recibida en un panel solar y ángulos de inclinación .....	12
3.4.5	Hora solar pico .....	12
3.5	Radiación solar en Ecuador .....	13
3.6	Energía eólica .....	15
3.6.1	Generador eólico.....	15
3.6.1.1	Tipos de generadores eólicos .....	16
3.7	Energía eólica en Ecuador .....	17
3.7.1	Potencial eólico del lugar .....	18
3.8	Sistema híbrido .....	18
3.8.1	Elementos de control y carga.....	19
3.9	Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) .....	19
3.9.1	Factor de demanda.....	19

3.10	Simulación de sistemas híbridos.....	20
3.11	Método de Monte Carlo.....	20
4	HIPÓTESIS.....	21
5	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	21
5.1	Evaluación del Recurso Solar y Eólico.....	22
5.2	Evaluación del recurso solar.....	24
5.3	Evaluación del recurso eólico.....	26
5.4	Diseño del Sistema Híbrido.....	29
5.5	Simulación del Sistema Híbrido.....	32
5.6	Generador eléctrico.....	38
5.7	Sistema de almacenamiento.....	39
5.8	Inversor DC/AC.....	40
5.9	Convertidor AC/DC.....	41
5.10	CALCULO DE LOS FILTROS PARA EL INVERSOR Y CONVERTOR.....	42
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
6.1	Evaluación del recurso eólico y solar.....	44
6.2	Cálculos de diseño del sistema híbrido.....	46
6.3	Evaluación de los paneles fotovoltaicos.....	48
6.1	Evaluación de los paneles fotovoltaicos variando la temperatura.....	51
6.2	Evaluación de la turbina eólica.....	52
6.3	Resultados de la simulación.....	54
7	CONCLUSIONES.....	58
8	RECOMENDACIONES.....	59
9	REFERENCIAS.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Colector solar [11].	11
Figura 3-2: Esquema del funcionamiento de un panel solar fotovoltaico [11].	11
Figura 3-3: Hora solar pico.	12
Figura 3-4: Potencial eléctrico Fotovoltaico Ecuador [14]	14
Figura 3-5: Tipos de radiación solar [15]	14
Figura 3-6: Esquema de las principales partes de una turbina eólica [11]	15
Figura 3-7: Generador eólico de eje horizontal	16
Figura 3-8: Generador eólico de eje vertical	17
Figura 3-9: Potencial eólico del Ecuador - potencial bruto [16]	17
Figura 3-10: Esquema de un Sistema híbrido.	18
Figura 3-11: Diagrama de flujo para la obtención de series sintéticas	21
Figura 5-1 Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto.	22
Figura 5-2: Ubicación de la medición del recurso solar y eólico	22
Figura 5-3: Medición del recurso solar	23
Figura 5-4: Medición del recurso eólico	23
Figura 5-5: Medición del recurso solar	25
Figura 5-6: Irradiancia promedio de cada semana del mes	25
Figura 5-7: Medición del recurso eólico	26
Figura 5-8: Velocidad del viento promedio de cada semana del mes	27
Figura 5-9: Proyección de la radiación solar promedio de los meses de marzo a diciembre del año 2024	28
Figura 5-10: Proyección de la velocidad del viento promedio de los meses de marzo a diciembre del año 2024	28
Figura 5-11: Esquema del sistema híbrido eólico-fotovoltaico.	29
Figura 5-12: Diagrama de bloques del sistema híbrido en Simulink	32
Figura 5-13: Panel fotovoltaico de la librería de Simulink (PV array)	33
Figura 5-14: Curvas de máxima potencia para dos paneles de 110 W	34
Figura 5-15: Turbina eólica de la librería de Simulink (PV array)	36
Figura 5-16: Potencia de salida en función a la velocidad del viento	37
Figura 5-17: Modelo de batería generador eléctrico en Simulink	38
Figura 5-18: Modelo de batería en Simulink	39
Figura 5-19: Modelo del inversor DC/AC	40

Figura 5-20 :Modelo del conversor AC/DC .....	41
Figura 6-1: Irradiancia promedio del mes de febrero .....	45
Figura 6-2: Velocidad del viento promedio del mes de febrero .....	45
Figura 6-3: Irradiancia promedio proyectada de los meses de marzo a diciembre .....	46
Figura 6-4: Velocidad del viento promedio del me marzo a diciembre .....	46
Figura 6-5: Modelo de panel fotovoltaico con valores nominales en Simulink.....	49
Figura 6-6: Modelo de panel fotovoltaico en Simulink considerando $432 W/m^2$ .....	49
Figura 6-7:Modelo de turbina eólica en Simulink empleando valores nominales .....	52
Figura 6-8:Modelo de turbina eólica en Simulink.....	52
Figura 6-9:Simulación del sistema hibrido realizado en Simulink.....	55
Figura 6-10: Voltaje de salida del sistema hibrido .....	55
Figura 6-11: Corriente de salida del sistema hibrido.....	56
Figura 6-12: Potencia de salida del sistema hibrido .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de Actividades.....	5
Tabla 2: Inclinación y orientación de los paneles solares [12].....	12
Tabla 3: Factores de demanda [18].....	20
Tabla 4: Características técnicas de Piranómetro MP-200.....	23
Tabla 5: Características técnicas de Anemómetro Acurite Professional Weather Center.....	24
Tabla 6: Demanda del sistema híbrido .....	30
Tabla 7: Dimensionamiento del sistema híbrido .....	30
Tabla 8: Características técnicas de paneles fotovoltaicos y aerogenerador.....	30
Tabla 9: Características técnicas del panel fotovoltaico de Simulink .....	33
Tabla 10: Características técnicas de 2 paneles fotovoltaicos.....	34
Tabla 11: Características técnicas de la turbina eólica de Simulink.....	36
Tabla 12: Características técnicas del generador eléctrico.....	38
Tabla 13: Características técnicas de la batería .....	39
Tabla 14: Características técnicas del inversor DC/AC .....	40
Tabla 15: Características técnicas del convertor AC/DC.....	42
Tabla 16: Métodos de aproximación para el factor Q y k [27].....	43
Tabla 17: Características técnicas de la batería .....	47
Tabla 18: Constantes para el cálculo de parámetros del panel fotovoltaico.....	50
Tabla 19: Parámetros de salida al variar la temperatura de los paneles fotovoltaicos .....	52
Tabla 20: Datos de entrada para el cálculo de parámetros de la turbina eólica.....	53
Tabla 21: Constantes para el cálculo del $C_p$ .....	53
Tabla 22: Recurso renovable en función de la carga de batería .....	57
Tabla 23: Parámetros de generación del sistema híbrido .....	57

## RESUMEN

**TÍTULO:** “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO”

**Autores:**

Farez Chuquitarco Diego Sebastián

Chicaiza Cando Erik Fabián

La presente tesis consiste en el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con la finalidad de implementar un prototipo que pueda ser utilizado para cargar equipos electrónicos, mediante el uso de energía renovable no convencional sin conexión a la red eléctrica, debido a la necesidad que presentan los usuarios del transporte público en zonas rurales y además la falta de servicio eléctrico por los cortes de energía que se presentan en el país por la crisis energética.

Considerando estos aspectos en esta tesis se realiza un estudio meteorológico con el fin de dimensionar el sistema a partir del comportamiento de la data de la velocidad del viento y la radiación solar de un mes bajo mediciones reales, y extrapolando la data a un año a partir del Método de Montecarlo. Asimismo, mediante la estimación de la carga eléctrica y a partir de las características técnicas de los elementos disponibles en el mercado se propone un diseño para el sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Luego se realiza una simulación del prototipo en el software Simulink integrando todos los elementos del sistema, y mediante el uso de las ecuaciones características de los paneles solares, así como de la turbina eólica se realiza la validación del funcionamiento del prototipo. Finalmente se logra comprobar que cuando la batería está cargada al 100 % el sistema produce 120 VAC y 378 W de potencia suficiente para abastecer la demanda propuesta de 200 W consiguiendo un diseño funcional y eficiente para su futura implementación.

**Palabras clave**—Sistema híbrido, generación solar, generación eólica, diseño, simulación.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** “DESIGN AND SIMULATION OF A HYBRID WIND-PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR ENERGY SUPPLY”

**Authors:**

Farez Chuquitarco Diego Sebastián

Chicaiza Cando Erik Fabián

The present thesis consists of the design and simulation of a hybrid wind-photovoltaic system with the purpose of implementing a prototype that can be used to charge electronic equipment, using non-conventional renewable energy without connection to the electricity network, due to the need presented by the users of public transport in rural areas and also the lack of electricity service because of the energy cuts presented in the country by the energy crisis.

Considering these aspects in this thesis a meteorological study is carried out in order to dimension the system from the behavior of the date of the wind speed and the solar radiation of a month under real measurements and extrapolating the date to a year from the Monte Carlo Method. Similarly, by estimating the electric charge and based on the technical characteristics of the elements available on the market, a design for the wind-photovoltaic hybrid system is proposed.

A simulation of the prototype is then carried out in the Simulink software integrating all the elements of the system, and by using the characteristic equations of the solar panels, as well as the wind turbine, the operation validation is performed. Finally, it is achieved that when the battery is charged to 100% the system produces 120 VAC and 378 W of power enough to supply the proposed demand of 200 W achieving a functional and efficient design for its future implementation.

**Keywords**—Hybrid system, solar generation, wind generation, design, simulation.

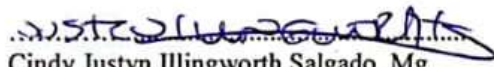
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**  
**Nombre del estudiante: Diego Sebastián Farez Chuquitarco**

## **AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo**

Cindy Justyn Illingworth Salgado\_con cédula de identidad número: 171362101-7 Magíster en: Educación Media y Superior, Mención Inglés con número de registro de la SENESCYT: 8201R-13-9074\_CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO** de: Diego Sebastián Farez Chuquitarco egresado de la carrera de Ingeniería en Electricidad, perteneciente a la Facultad de: **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, agosto, 2024

  
Cindy Justyn Illingworth Salgado, Mg.  
CI: 1713621017

# 1 INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** Diseño y Simulación de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico para el Abastecimiento Energético

**Modalidad de Titulación:**

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

**Carrera:** Ingeniería en Electricidad

**Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:** Desarrollo de sistemas eléctricos eficientes a nivel residencial, comercial e industrial.

**Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:**

Tutor: Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo Msc.

Estudiantes: Chicaiza Cando Erik Fabian

Farez Chuquitarco Diego Sebastian

**Área de Conocimiento**

07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación**

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sub líneas de investigación de la Carrera:**

Conversión y uso racional de energía eléctrica

## 2 INTRODUCCIÓN

El abastecimiento energético por medio de fuentes de energía renovable no convencional (ERNC) presenta un desafío significativo debido a la necesidad de considerar variables aleatorias como la velocidad del viento y la radiación solar. En la actualidad, la mayoría de los países industrializados están recurriendo a sistemas de generación eléctrica basados en energías renovables con sistemas de almacenamiento de energía integrados. Esto se debe a los altos costos asociados con la generación, transmisión y distribución de electricidad, así como a la contaminación generada por el uso de combustibles fósiles [1].

Con el tiempo y los avances en investigación, se ha logrado combinar diversas fuentes de ERNC para satisfacer demandas específicas, dando lugar a sistemas de generación híbridos. Estos sistemas se han convertido en una alternativa eficiente para electrificar zonas rurales. Mientras que países como Italia, España, China y otros han implementado sistemas diversos para abastecer dispositivos electrónicos en áreas urbanas, rurales y espacios públicos como parques, estaciones de tren, paradas de autobuses, promoviendo un desarrollo energético independiente de la red eléctrica tradicional. Esto abarca desde la carga de dispositivos como celulares, parlantes inalámbricos hasta bicicletas eléctricas [2].

De esta manera en [3], se presenta un documento que analiza el potencial de energía solar y eólica en Ecuador y los esfuerzos del gobierno por promover su uso, con el objetivo de lograr una participación del 15% de energía renovable no convencional en la matriz energética para el año 2030. Concluyendo que la energía solar fotovoltaica tiene un gran potencial en Ecuador y puede contribuir significativamente a la transición energética del país. Asimismo, en [4] se habla de las ventajas que ofrece el uso de las energías renovables no convencionales especialmente en zonas rurales o montañosas, donde los recursos naturales son una ventaja considerable. La estrategia territorial basada en la evaluación de fuentes naturales como la radiación solar y la velocidad del viento puede ser altamente beneficiosa para el desarrollo local y regional.

Considerando estos aspectos la presente investigación propone el diseño y la simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con el fin de abastecer dispositivos electrónicos en zonas rurales, utilizando fuentes de energía renovable no convencional como la solar y la eólica, y permitiendo crear centros de carga autónoma para el usuario del transporte público para que puedan cargar sus dispositivos móviles mientras realizan sus actividades diarias promoviendo el uso de energía limpia que no causa daño al medio ambiente.

## **2.1 Situación Problemática**

El alto crecimiento de la demanda de energía eléctrica en áreas rurales plantea un desafío grande en el abastecimiento energético y en la mejora de la calidad de vida de sus habitantes. Estas zonas, a menudo aisladas de la red eléctrica tradicional requieren de sistemas energéticos que promuevan el uso de ERNC tal como un sistema híbrido eólico- fotovoltaico el cual puede abastecer la demanda de forma eficiente, de esta manera según INEC se registran cifras de habitantes rurales y urbanos en Latacunga de la siguiente forma: área rural tiene 106.647 habitantes, y en el área urbana tiene 63.842 habitantes [1], para lo cual se aprecia que existen más habitantes rurales que urbanos, considerando estos datos ELEPCO.SA muestra que el porcentaje de cobertura eléctrica de está en el orden del 98,11 % [5], teniendo en cuenta usuarios urbanos y rurales, el resto del porcentaje que es 1,89% corresponde a usuarios sin acceso a electricidad, de esta manera la falta de acceso a electricidad a dichos usuarios crea una situación que no solo limita el acceso a la energía de la población, sino que también limita el desarrollo socioeconómico y la inclusión tecnológica ya que los usuarios no pueden cargar sus dispositivos electrónicos, que son esenciales para la comunicación, la educación y el trabajo.

El país enfrenta una crisis energética caracterizada por la dependencia de fuentes de energía no renovables, falta de recursos y mantenimiento en generación, además del cambio climático que ha ocasionado sequías en el país, esta situación ha resultado en un impacto negativo enfocado principalmente en cortes de energía eléctrica lo cual ha resultado pérdidas para los sectores industriales, comerciales y residenciales, además el descontento social en la mayor parte del país.

## **2.2 Formulación del Problema**

Se requiere desarrollar un diseño de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para proporcionar energía a equipos electrónicos en áreas rurales sin acceso a la red eléctrica y cuando exista deficiencia de servicio eléctrico por cortes programados por la crisis energética que se presenta actualmente el país. Este diseño debe considerar la variabilidad meteorológica tanto del recurso solar como del eólico, con el fin de garantizar un suministro de energía confiable, los resultados del diseño se validan mediante simulaciones en el software Simulink.

## **2.3 Objeto y campo de acción**

### **2.3.1 Objeto de Investigación**

Simulación del sistema híbrido eólico- solar, velocidad del viento, radiación solar.

### **2.3.2 Campo de acción**

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.99 Otras (Energías alternativas y renovables)

## **2.4 Beneficiarios**

### **2.4.1 Directo**

Los beneficiarios directos de la investigación son los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Electricidad o carreras afines de la Universidad Técnica de Cotopaxi e investigadores relacionado con la energía renovable, la ingeniería eléctrica y el desarrollo sostenible, ofreciendo datos y experiencias prácticas que pueden ser aplicadas en futuras investigaciones y proyectos.

### **2.4.2 Indirecto**

Comunidades y personas en general que requieren de abastecimiento energético cuando se den los cortes de energía.

## **2.5 Justificación**

El diseño de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico es una solución ingeniosa que surge de la falta de acceso a la electricidad en zonas rurales y el desabastecimiento energético cuando hay cortes programados por la crisis energética del país, de esta forma al emplear fuentes de energía renovables no convencionales como la eólica y fotovoltaica no sólo proporciona energía sostenible y limpia, sino que también aprovecha en gran medida los recursos naturales del lugar destinado para el proyecto, lo cual también promueve los avances tecnológicos en la ciudad de Latacunga, considerando estos aspectos el presente proyecto investigativo tiene impactos tecnológicos, sociales y ambientales positivos que justifican plenamente su desarrollo y futura implementación.

La presente investigación pretende realizar un estudio de recursos eólico y solar para verificar la factibilidad del proyecto, el diseño se lo realiza a partir de elementos existentes en el mercado

de esta manera se considera un diseño más real en el caso de que se pretenda implementar el prototipo, la simulación de Simulink integra todos elementos los previamente diseñados lo que garantiza que el sistema se pruebe en diferentes escenarios de simulación.

## 2.6 Objetivos

### 2.6.1 General

- Realizar el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico mediante el uso de energía renovable no convencional para abastecer equipos electrónicos.

### 2.6.2 Específicos

- Evaluar la data de velocidad del viento y radiación solar para la verificación de si el lugar es factible para la implementación del sistema híbrido.
- Diseñar sistema eólico-fotovoltaico mediante el uso de AutoCad basado en la estimación de la carga eléctrica necesaria y en las características técnicas de los elementos disponibles en el mercado asegurando que cumpla con los requisitos de energía y las condiciones ambientales.
- Simular el sistema híbrido en el software Simulink integrando todos los elementos del sistema y utilizando las ecuaciones características de los paneles solares y la turbina eólica.

## 2.7 Sistema de actividades

En esta sección se detallará las actividades que se realizará mediante el enfoque establecido por los objetivos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Sistema de Actividades.

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad</b>	<b>Resultado de la actividad</b>	<b>Técnica e instrumentos</b>
Evaluar la data de velocidad del viento y radiación solar para la verificación de si el lugar es factible	Selección del lugar donde se recolectará los datos como la velocidad del viento y la	Verificación de la factibilidad del lugar seleccionado para el funcionamiento del sistema híbrido	La obtención de datos de recurso solar y eólico se llevó a cabo utilizando Apogee MP-200 para la

<p>para la implementación del sistema híbrido.</p>	<p>radiación solar, que se utilizarán para el desarrollo del trabajo de investigación.</p>		<p>toma datos de la radiación solar y anemómetro Acurite professional weather center para la toma de datos de la velocidad del viento</p>
	<p>Análisis de las mediciones de radiación solar y velocidad del viento recopiladas mediante una tabulación de datos.</p>	<p>Obtención de la velocidad de viento y radiación solar promedio existente en el lugar destinado para el proyecto</p>	<p>Se lo realizo mediante un análisis comparativo de la radiación solar y velocidad del viento diaria, semanal, mensual.</p>
<p>Diseñar sistema eólico-fotovoltaico mediante el uso de AutoCad basado en la estimación de la carga eléctrica necesaria y en las características técnicas de los elementos disponibles en el mercado asegurando que cumpla con los requisitos de</p>	<p>Realizar un estudio de cargas para asegurar un adecuado dimensionamiento</p>	<p>Obtención de la demanda de energía eléctrica que se requiere abastecer</p>	<p>Estudio de cargas tomando como referencia la Norma NEC</p>
	<p>Dimensionamiento de los equipos que se utilizarán para el diseño del sistema híbrido en función a la demanda establecida.</p>	<p>Se presenta el diseño del sistema híbrido representado en AutoCad</p>	<p>Diseño del sistema híbrido utilizado un software de diseño especializado en este caso AutoCad</p>

energía y las condiciones ambientales.			
Simular el sistema híbrido en el software Simulink integrando todos los elementos del sistema y utilizando las ecuaciones características de los paneles solares y la turbina eólica.	Selección de los bloques de Simulink tanto de la turbina eólica y paneles fotovoltaicos, batería.	Comprobación de funcionalidad de los elementos a emplear en el sistema híbrido.	Ecuaciones de modelado matemático de los paneles y turbina eólica.
	Caracterización de los elementos de conversión tales como el inversor DC-AC y el convertidor AC-DC	Obtención de elementos de conversión de energía eficientes para el funcionamiento del sistema híbrido	Ecuaciones para la de los respectivos filtros RLC y RC de cada elemento de conversión.

### 3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se presentan las bases teóricas en las cuales se basa este proyecto para desarrollar el diseño y la simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico, con la finalidad de implementar un prototipo destinado a cargar equipos electrónicos. Este sistema utiliza energía renovable no convencional y opera sin conexión a la red eléctrica, atendiendo así a la necesidad crítica de los usuarios del transporte público en zonas rurales. Estas áreas a menudo carecen de infraestructura eléctrica adecuada, lo que limita significativamente el acceso a la energía y en consecuencia la capacidad de los usuarios para mantener sus dispositivos electrónicos cargados. La falta de acceso a la electricidad no solo afecta la comunicación y el acceso a la información, sino que también restringe oportunidades educativas y laborales. Al combinar las tecnologías de energía solar y eólica, el sistema híbrido propuesto pretende ofrecer una solución sostenible y eficiente que aprovecha los recursos naturales disponibles en estas regiones. La futura implementación de este prototipo no solo busca mejorar la calidad de vida del usuario, sino también promover el uso de energías limpias y reducir la dependencia de

combustibles fósiles, contribuyendo así al desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente.

### **3.1 Antecedentes de la investigación**

Los antecedentes ligados con el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico es de gran importancia y esto se refleja en la diversidad de estudios involucrados en el trabajo de investigación, aunque se sabe que el agotamiento de los combustibles fósiles y los efectos del cambio climático han impulsado la búsqueda de energías renovables. Las opciones más beneficiosas y respetuosas con el medio ambiente son la energía solar y eólica, la combinación de estas dos fuentes de energía en un sistema híbrido proporciona una solución eficiente para proporcionar energía estable, especialmente en áreas rurales y remotas. Esto impulsa a más investigadores a cambiar sus métodos y así lograr excelentes resultados, como se describe en la investigación titulada “Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para el abastecimiento energético” donde se implementa la simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico se lleva a cabo en el software Simulink de Matlab.

Un antecedente importante para esta investigación fue el artículo realizado por el Dr. Gitana Saha con estudiantes de Ingeniería eléctrica [3], que detalla un sistema híbrido eólico-fotovoltaico que utiliza Simulink de Matlab para modelar y analizar el rendimiento del sistema. Se utiliza una turbina eólica, que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica, la turbina se conecta a un generador y a un sistema de control que optimiza su funcionamiento. El sistema solar fotovoltaico consiste en un arreglo de paneles solares y que tanto el sistema eólico como el solar se integran mediante un inversor que convierte la energía de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), la cual se puede conectar a la red o utilizar para cargar baterías.

Sin embargo, en la investigación [2], se centra en presentar el caso de la comunidad de Boca de Lula en la provincia de Coclé. Donde se evaluó, diseño, monto y se situó un sistema híbrido, eólico-solar con una capacidad de 2,17 kW, que brinda electricidad al Centro escolar municipal a medida que aumentan los costos. Los combustibles fósiles y su impacto en el medio ambiente aumentan, promueven la introducción de nuevas tecnologías para satisfacer la demanda energía y reducir el efecto invernadero.

Por otra parte, en [6], se realiza una comparación entre la modelación matemática y la simulación de un panel solar en el software Simulink, con el fin de identificar el mejor método para caracterizar el potencial energético. Se utiliza la potencia generada bajo diversas

condiciones, y se compara los dos métodos utilizando datos reales de radiación solar y temperatura de operación del panel. Donde se concluye que ambas técnicas tienen buena correlación, aunque el modelo matemático ofrece una mejor aproximación.

Mientras que en [7] se emplea el método de Monte Carlo para crear series sintéticas mediante la generación de múltiples escenarios posibles basados en distribuciones de probabilidad, y así evaluar el estado de salud de las baterías de iones de litio bajo diferentes escenarios de uso en el argumento de las microrredes y los autos eléctricos.

En la investigación [8], se presenta un documento que estudia el potencial de energía solar fotovoltaica en Ecuador y los esfuerzos del gobierno por promover su uso, con el objetivo de lograr una participación del 15% de energía renovable no convencional en la matriz energética para el año 2030. Concluyendo que la energía solar fotovoltaica tiene un gran potencial en Ecuador y puede contribuir significativamente a la transición energética del país.

Todos estos estudios mencionados son ejemplos de investigaciones realizadas en el diseño y simulación de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, demostrando la variedad de investigaciones que pueden llevarse a cabo en este campo específico de ERNC.

### **3.2 Energía renovable**

La energía renovable es aquella que toma como orígenes materiales infinitos en la naturaleza por ser ilimitados o por su rápida regeneración, contaminando menos en el proceso de generación de electricidad [4].

Según el autor [3], para satisfacer la demanda de energía y al mismo tiempo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizan recursos renovables como alternativa a los combustibles fósiles. La energía solar y la eólica son bien conocidas para este proceso de generar electricidad. De esta forma muchos gobiernos de todo el mundo la consideran a la energía eólica y fotovoltaica como las mejores fuentes de energía renovable para invertir ya que la inversión inicial con el pasar del tiempo se puede recuperar, de esta forma este tipo de energías también presenta desafíos debido a su naturaleza periódica e impredecible, es así que para aprovechar de forma adecuada estos dos recursos se tienen los sistemas híbridos los cuales proporcionan una de las mejores fuentes de energía combinando dos recursos naturales renovables y además de crear sistemas cada vez más fiables y económicos para el abastecimiento energético.

### **3.3 Energía renovable no convencional (ERNC)**

El abastecimiento energético a través de fuentes de energía renovable no convencional (ERNC) presenta un desafío significativo debido a la necesidad de considerar variables aleatorias como la velocidad del viento y la radiación solar de esta forma se requieren sistemas eficientes que consideren la variabilidad meteorológica además de que puedan abastecer una demanda sin interrupciones [9].

Los recursos energéticos a partir de ERNC surgen como una solución innovadora y beneficiosa en la disputa contra el cambio climático y el desarrollo de un acceso equitativo a la electricidad. Estos recursos, que incluyen la energía solar, eólica, biomasa, entre otros, están siendo cada vez más adoptados en todo el mundo [4].

Asimismo, en [10] se habla de las ventajas que brinda el uso de las energías renovables no convencionales especialmente en zonas rurales o montañosas, donde los recursos naturales son una ventaja considerable. La estrategia territorial basada en la evaluación de fuentes naturales como la radiación solar y la velocidad del viento puede ser altamente beneficiosa para el desarrollo local y regional.

### **3.4 Energía Solar**

En [4] muestra que, la energía solar es una de las primordiales fuentes de energía renovable y juega un rol importante en la en la transición energética. Ayudar a promover el uso de energía limpia, proteger el medio ambiente y a mejorar el bienestar humano, además de garantizar el desarrollo local, comercial e industrial, los progresos científicos han convertido la energía solar en una de las fuentes de energía más eficaz y financieras en la industria de las energías renovables. Así, esta fuente inagotable de energía atrae cambios para crear empleos y hace que las empresas sean más competitivas, además de favorecer a la sostenibilidad del planeta.

#### **3.4.1 Energía solar térmica**

La energía solar térmica, también conocida como termo solar, es una tecnología que utiliza sistemas activos para utilizar la radiación solar para producir energía. Estos sistemas incluyen elementos o dispositivos específicamente diseñados para captar y, en ocasiones, almacenar la energía solar.

La energía solar térmica se basa en la transformación de la radiación solar en calor. Esto se consigue mediante el uso de paneles solares térmicos, colectores que concentran la radiación

solar en un lugar específico como se observa la Figura 3-1, calentando un fluido o un material que puede ser utilizado para producir vapor, agua caliente o incluso aire caliente [11].



Figura 3-1: Colector solar [11].

### 3.4.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica convierte directamente la luz solar en electricidad mediante el uso de células solares, estas células están compuestas principalmente de materiales semiconductores, como el silicio como se visualiza en la Figura 3-2, que generan corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar, este asunto se conoce como efecto fotovoltaico [11].

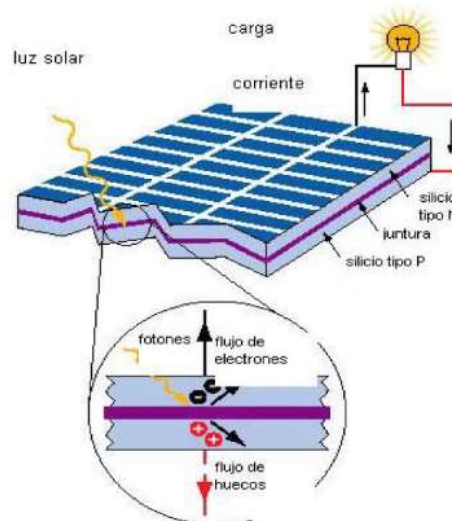


Figura 3-2: Esquema del funcionamiento de un panel solar fotovoltaico [11].

### 3.4.3 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

- **Sistemas Aislados:** No están acoplados a la red eléctrica y suelen usar baterías para almacenar la energía generada, son excelentes para áreas añejas sin acceso a la red.

- **Sistemas Conectados a la Red (On-Grid):** Estos sistemas están acoplados a la red eléctrica. Permiten que el exceso de energía generada sea enviado a la red, y cuando la generación es insuficiente, se puede consumir energía de la red.
- **Sistemas Híbridos:** Adoptan rasgos de los sistemas aislados y conectados a la red. Pueden acumular energía en baterías y asimismo están conectados a la red, abasteciendo una mayor maleabilidad y seguridad en el suministro de energía.

#### 3.4.4 Radiación solar recibida en un panel solar y ángulos de inclinación

La tendencia de los paneles solares ver Tabla 2, generalmente permite agrandar la cantidad de  $W/m^2$  que se recoge en el panel y busca maximizar el beneficio de la radiación solar. Determinar el ángulo de inclinación adecuado ya que siempre se basará en el sitio geográfico de la instalación, para Ecuador los paneles deben tener una inclinación de  $15^\circ$  para reducir las pérdidas al 1%.

Tabla 2: Inclinación y orientación de los paneles solares [12]

Latitud	Angulo de inclinación máximo
$0^\circ - 5^\circ$	$0^\circ - 10^\circ$
$6^\circ - 20^\circ$	Latitud local $+5^\circ$
$21^\circ - 45^\circ$	Latitud local $+10^\circ$
$46^\circ - 65^\circ$	Latitud local $+15^\circ$
$66^\circ - 75^\circ$	$80^\circ$

#### 3.4.5 Hora solar pico

La hora de sol pico se refiere al momento del día en el que la radiación solar es más penetrante y se produce la mayor cantidad de energía solar, en general, la hora de sol pico ocurre cuando el sol está en su punto más alto en el cielo, lo que suele ser alrededor del mediodía solar ver la Figura 3-3.

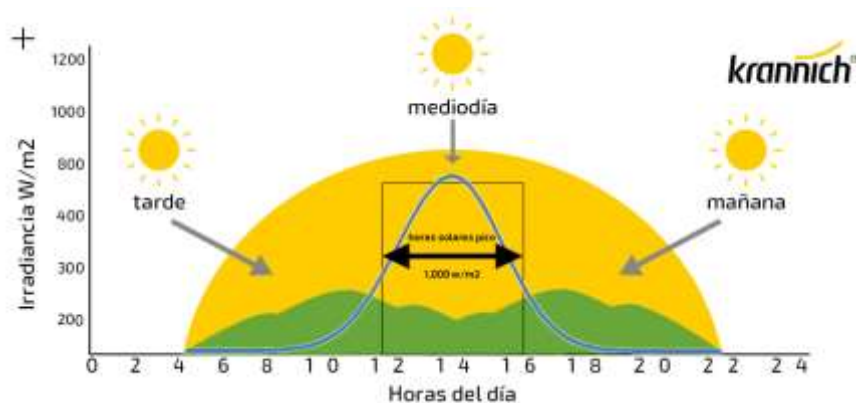


Figura 3-3: Hora solar pico

### 3.5 Radiación solar en Ecuador

Alrededor de una media de la radiación solar global en Ecuador es  $4200 \text{ kWh/año}$  es mucho más que en España que son  $1400 \text{ kWh/año}$ , en la parte peninsular, pero la diferencia es de más del 30% con respecto al sitio en el Ecuador continental y más del 40% en balance con las Islas Galápagos.

Diferentes relaciones características atmosféricas y topográficas del Ecuador, las latitudes son muy diferentes de las Galápagos al Amazonas, genera las situaciones son muy diferentes la radiación obviamente tiene un efecto cálculo del tamaño de la instalación satisfacer ciertas necesidades [13].

La Figura 3-4 muestra el potencial eléctrico fotovoltaico en Ecuador, basada en el promedio de largo plazo del potencial eléctrico fotovoltaico. A continuación, se presenta un resumen de la información:

#### a) Colores y Rango de Potencial:

- Rojo Oscuro: Indica el mayor potencial fotovoltaico, con valores de hasta  $1753 \text{ kWh/kWp}$ .
- Amarillo: Representa un potencial medio, alrededor de  $1400 - 1500 \text{ kWh/kWp}$ .
- Verde: Señala un potencial menor, con valores en torno a  $876 - 1022 \text{ kWh/kWp}$ .

#### b) Zonas con Mayor Potencial:

- Región Costera: Particularmente las áreas cercanas a Guayaquil y Machala muestran los valores más altos, alcanzando hasta  $1753 \text{ kWh/kWp}$ .
- Islas Galápagos: También presentan un alto potencial fotovoltaico, similar al de la región costera.

#### c) Zonas con Potencial Medio:

- Región Interandina: Áreas alrededor de Quito, Cuenca, Loja y Ambato tienen un potencial fotovoltaico medio, generalmente entre  $1168$  y  $1314 \text{ kWh/kWp}$ .

#### d) Zonas con Menor Potencial:

- Región Amazónica: Esta área muestra los valores más bajos de potencial fotovoltaico, aunque aún considerables, con un rango de  $876 - 1022 \text{ kWh/kWp}$ .

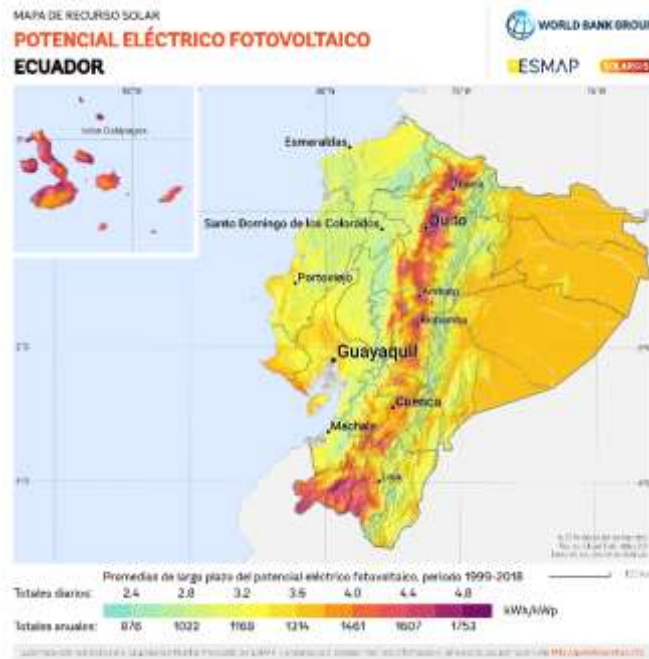


Figura 3-4: Potencial eléctrico Fotovoltaico Ecuador [14]

En función de cómo afecta la zona de la tierra ver la Figura 3-5, la radiación solar se clasifica en tres categorías:

- **Radiación directa:** Proviene directamente del aire a través de la atmósfera el sol se dirige hacia un lugar específico de la zona terrestre.
- **Radiación difusa:** Es aquella que atraviesa la atmósfera y traspasa obstáculos como las nubes para alcanzar a la superficie de la Tierra.
- **Radiación global o reflejada:** El suelo o cualquier otra superficie cercana refleja la radiación reflejada cuando pasa por la atmósfera.

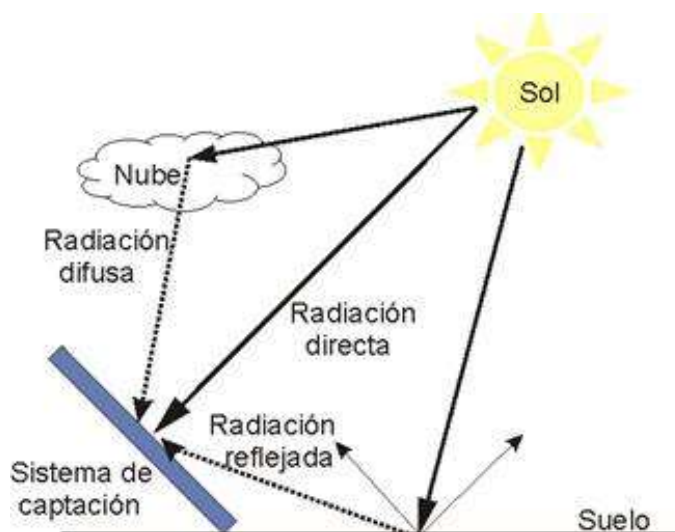


Figura 3-5: Tipos de radiación solar [15]

### 3.6 Energía eólica

La energía eólica se clasifica como una forma de energía no convencional, proviene del viento se utiliza para producir energía eléctrica a través de aerogeneradores o molinos de viento, los aerogeneradores convierten la energía mecánica del viento en energía eléctrica a través de un generador. Además, la energía eólica es una de las fuentes de energía más ecológicas y menos contaminantes porque no crea emisiones de gases de efecto invernadero ni desechos peligrosos.

El viento sujeto ascendentes o mínimos índices de energía cinética, que mediante un sistema de aspas y turbinas puede transformar en energía eléctrica, para así sustentar ciudades, mercados comerciales, industriales o residencias rurales. Sobre todo, en territorios geográficas de vientos firmes e intensos, este recurso natural renovable brinda una ganancia relativamente importante, positivo y ecológico.

#### 3.6.1 Generador eólico

Los generadores eólicos son dispositivos que transforman la energía del viento en energía mecánica y luego en energía eléctrica, estos dispositivos se utilizan para generar electricidad de manera sostenible y renovable [11] véase la Figura 3-6 donde se aprecia las partes de una turbina eólica.

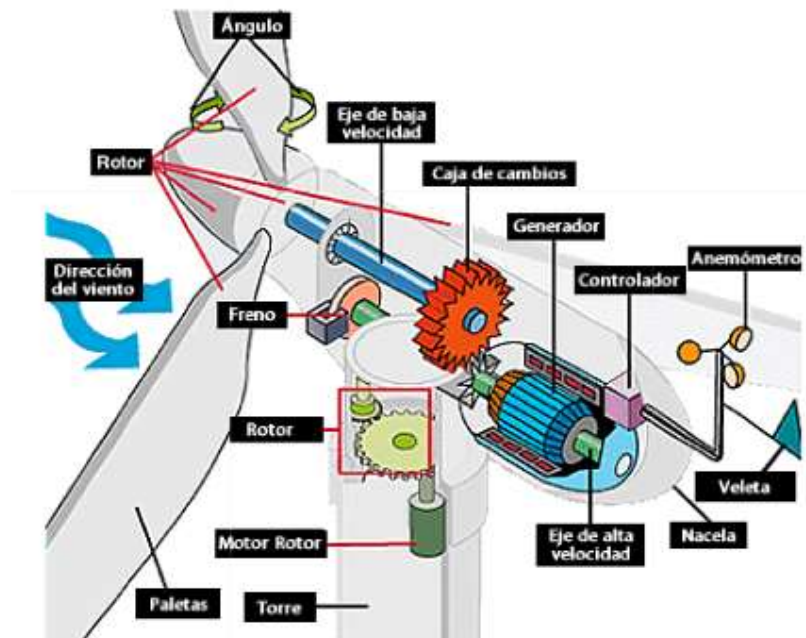


Figura 3-6: Esquema de las principales partes de una turbina eólica [11]

La turbina eólica se coloca en ciertas alturas donde los vientos tengan mayor intensidad, para lo cual se aprovecha una torre, que admita el giro de las aspas, es tal la variedad de dimensiones de las turbinas eólicas hallar con aspas de cuyo diámetro va desde 1 hasta 128 metros.

#### 3.6.1.1 *Tipos de generadores eólicos*

Los generadores eólicos pueden ser clasificados en dos categorías principales:

**Generadores eólicos de eje horizontal:** son los más frecuentes y se encuentran en la totalidad de los parques eólicos. El eje de giro es paralelo al suelo, tiene una gran altura de pieza y un mecanismo de rotor que orienta el aerogenerador para adaptarse a los cambios de trayectorias del viento. Los modelos habituales de aerogeneradores de eje horizontal utilizan tres palas y son la solución más eficiente véase la Figura 3-7.



Figura 3-7: Generador eólico de eje horizontal

**Generadores eólicos de eje vertical:** Tienen el eje principal vertical y son menos comunes, el eje de rotación está en posición vertical. Los bordes no necesitan estar encaminados hacia el viento y no requieren una gran altura para aprovechar su potencia ver la Figura 3-8.



### 3.7.1 Potencial eólico del lugar

El recurso renovable eólico sufre cambios debido a las condiciones del lugar, también conocidas como régimen de viento, es fundamental conocer la disponibilidad eólica existente en lugar de realizar estudios como:

- La ubicación geográfica.
- La ubicación del lugar.
- La altura geográfica.
- Tiempo del día.
- La condición ecológica del lugar de interés.

Dado que el viento es causado por la discrepancia de densidad del aire, estas circunstancias están relacionadas con la radiación solar, la intensidad de la radiación solar en Ecuador es impresionante debido a su ubicación geográfica estratégica [16].

### 3.8 Sistema híbrido

Un sistema híbrido es un sistema que combina dos o más tecnologías o enfoques diferentes para lograr un objetivo o función común, los sistemas híbridos se manejan en una diversidad de campos, como la ingeniería donde pueden optimizar el uso de recursos y reducir los costos[17].

En la Figura 3-10, fundamentalmente una forma de la energía generada por la fuerza del viento y el beneficio de la radiación solar.

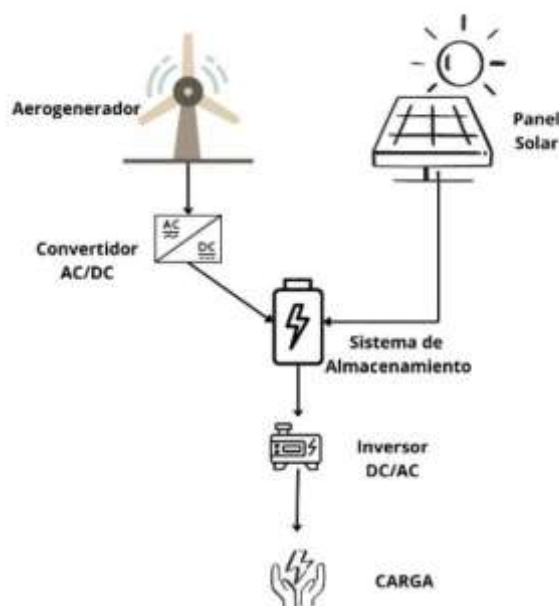


Figura 3-10: Esquema de un Sistema híbrido

### 3.8.1 Elementos de control y carga

Los sistemas de generación de energía híbrida eólico-fotovoltaico requieren varios componentes clave para gestionar y optimizar la producción, almacenamiento y distribución de energía. Entre los componentes de control y carga más importantes se encuentran los siguientes:

**Convertidor:** El convertidor es un dispositivo esencial en los sistemas de energía híbrida, encargado de convertir la energía de corriente continua (CC) generada por los paneles solares y las turbinas eólicas en la forma adecuada para su uso o almacenamiento.

**Sistema de almacenamiento:** El sistema de almacenamiento de energía es importante para garantizar un suministro continuo y confiable, especialmente cuando la generación de energía solar y eólica es intermitente.

**Inversor:** El inversor es un componente vital en cualquier sistema fotovoltaico o híbrido, ya que convierte la energía de corriente continua (CC) generada por los paneles solares y turbinas eólicas en corriente alterna (CA), que es el tipo de energía utilizada en la mayoría de las aplicaciones domésticas y comerciales.

Estos componentes de control y carga trabajan juntos para asegurar que un sistema híbrido eólico-fotovoltaico funcione de manera eficiente y confiable, proporcionando una fuente de energía sostenible y estable.

## 3.9 Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)

De acuerdo con [18], en relación con estudio de demanda y factor de demanda, los cálculos de diseño se deben considerar los siguientes parámetros:

- Para iluminación: Se debe considerar por cada salida de iluminación una carga máxima de 100 *Vatios (W)*.
- Para tomacorrientes: Se debe considerar por cada salida de tomacorriente una carga de 200 *W*.
- Para cargas especiales: Se consideran aquellas salidas para equipos cuya potencia sobrepasa los 1.500 *W*.

### 3.9.1 Factor de demanda

Los factores de demanda a considerar para iluminación y enchufes de uso general se basan en el tipo de hogar se indican en Tabla 3.

Tabla 3: Factores de demanda [18]

<b>Vivienda Tipo</b>	<b>FD Iluminación</b>	<b>FD Tomacorriente</b>
Pequeña-Mediana	0,7	0,5
Mediana grande-Grande	0,55	0,4
Especial	0,53	0,3

### **3.10 Simulación de sistemas híbridos**

La simulación de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos es un instrumento esencial para el diseño y optimización de estos sistemas, es posible modelar y analizar la conducta del sistema en una complejidad de condiciones meteorológicas y de carga utilizando software especializado como Simulink de Matlab. La simulación ayuda a predecir la eficiencia del sistema, encontrar problemas potenciales y optimizar los parámetros de diseño antes de que se implementen físicamente, además, ayuda en la evaluación de la viabilidad económica y la planificación de la composición de energías renovables en redes eléctricas existentes [19].

### **3.11 Método de Monte Carlo**

El método Monte Carlo es una técnica cuantitativa ampliamente utilizado en diversos campos para la simulación y el análisis probabilístico ver la Figura 3-11, su objetivo principal es realizar experimentos utilizando secuencias de números aleatorios, con estos experimentos es posible observar el comportamiento de la base de datos como muestra, lo que permite evaluar posibles resultados y analizar en detalle las probabilidades involucradas [20].

Este método se basa en crear una gran cantidad de escenarios aleatorios que se repiten para obtener una distribución de posibles resultados, el análisis de estos resultados puede identificar patrones y tendencias que son difíciles de detectar utilizando métodos de análisis tradicionales [21].

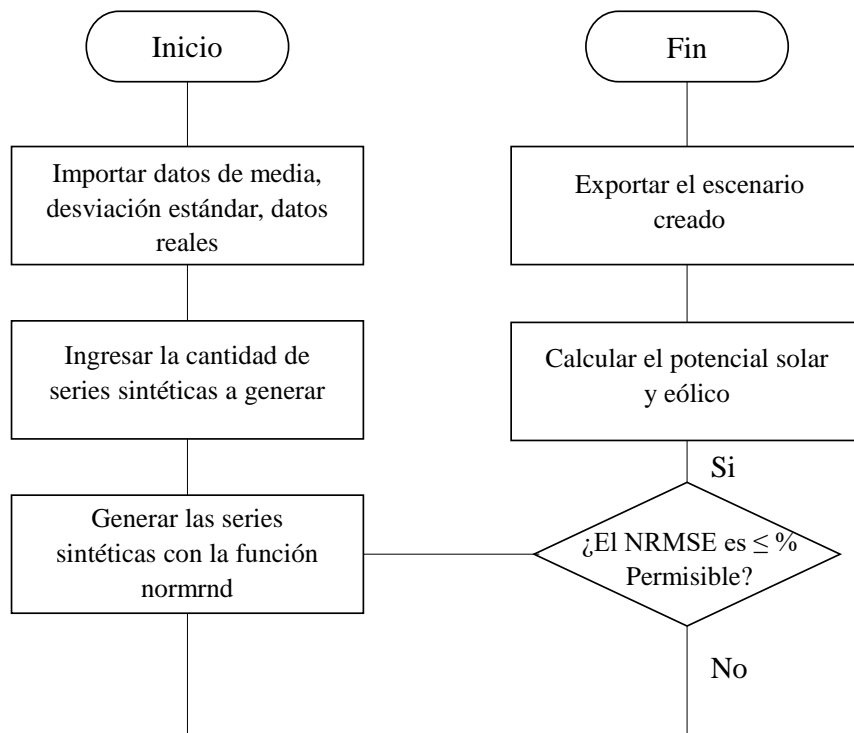


Figura 3-11: Diagrama de flujo para la obtención de series sintéticas

## 4 HIPÓTESIS

Con el diseño y simulación de un sistema híbrido eólico fotovoltaico se podrá obtener un prototipo que permitirá abastecer equipos electrónicos en zonas rurales aisladas de la red y proporcionar energía en situaciones de desabastecimiento energético ocasionadas por cortes programados.

## 5 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En la Figura 5-1, se presenta el diagrama de bloques correspondiente a la metodología llevada a cabo para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se realiza la estimación del recurso solar y eólico en la ubicación establecida para el efecto, con la finalidad de obtener el recurso energético disponible para el funcionamiento del proyecto. En segundo lugar, se lleva a cabo el diseño del sistema híbrido eólico-fotovoltaico a partir del análisis de cargas del proyecto, y del dimensionamiento de los equipos necesarios para su implementación futura. Por último, se realiza la simulación del sistema híbrido en el software Simulink, donde se construye el sistema en base a los elementos previamente dimensionados, y se realiza una evaluación del

funcionamiento en base a los datos de entrada del recurso solar y eólico establecido previamente.

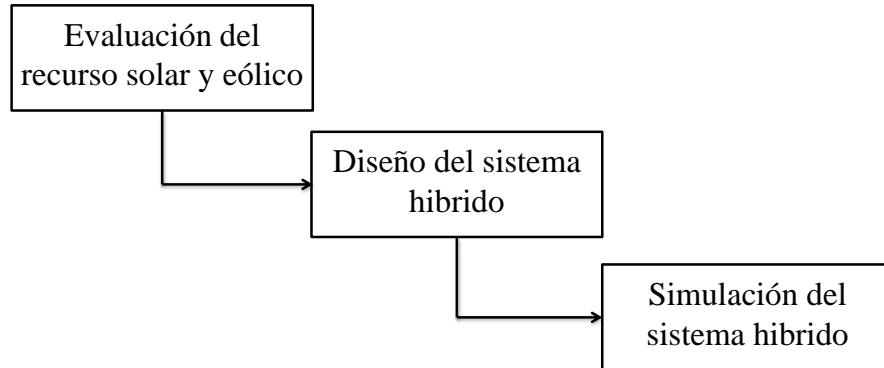


Figura 5-1 Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto

### 5.1 Evaluación del Recurso Solar y Eólico

La evaluación del recurso solar y eólico se lleva a cabo en el barrio San Juan, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, bajo las coordenadas geográficas:  $-0.9547882418655281$ ,  $-78.62924120601562$ . En la Figura 5-2, se muestra la ubicación exacta destinada para el desarrollo del proyecto.



Figura 5-2: Ubicación de la medición del recurso solar y eólico

De esta forma se colocaron los elementos de medición en el lugar previsto como se muestra la Figura 5-3, donde se puede ver el piranómetro de marca apogee modelo mp-200 ubicado de forma estratégica para realizar la medición de la radiación solar. Por otra parte, también se utiliza un anemómetro de marca Acurite professional weather center el cual permite realizar la medición de la velocidad del viento, este de igual forma se ubica en un lugar donde no existan objetos que intervengan en la medición, tal como se observa en la Figura 5-4.



Figura 5-3: Medición del recurso solar



Figura 5-4: Medición del recurso eólico

Los instrumentos de medida utilizados para la adquisición de los datos se especifican en la Tabla 4 y Tabla 5, Para lo cual las características técnicas del piranómetro Apogee MP-200 se obtienen a partir de [22], mientras que el datasheet del anemómetro Acurite professional weather center se obtiene a partir de [23].

Tabla 4: Características técnicas de Piranómetro MP-200

<b>Piranómetro MP-200</b>	
<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Incertidumbre de calibración a 1000 W/m <sup>2</sup>	Menos de 3 %
No linealidad	Menos del 1 % hasta 2000 W/m <sup>2</sup>
Tiempo de respuesta	Menos de 1 ms
Campo de visión	180°
Rango espectral	360 a 1120 nm

Dimensiones de los sensores	Integrado con medidor: 24 mm de diámetro, 33 mm de altura
Dimensiones del medidor	126 cm de largo, 70 mm de ancho, 24 mm de alto

Tabla 5: Características técnicas de Anemómetro Acurite Professional Weather Center

<b>Anemómetro Acurite Professional Weather Center</b>	
<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Velocidad del Viento	0 a 99 mph; 0 a 159 kph
Precisión de la Velocidad del Viento	+/- 2 mph por debajo de 10 mph +/- 3 mph de 10 a 30 mph +/- 4 mph de 30 a 50 mph +/- 5 mph de 50 a 99 mph
Alcance Inalámbrico	330 pies / 100 metros dependiendo de los materiales de construcción del hogar
Actualización de Datos	Velocidad del Viento: actualizaciones cada 18 segundos
Dimensiones	8.2 pulgadas de alto x 6.7 pulgadas de ancho x 2.7 pulgadas de profundidad

## 5.2 Evaluación del recurso solar

Con los datos obtenidos mediante el piranómetro se puede llevar a cabo el análisis de la radiación solar como se observa en la Figura 5-5, donde se observa la conducta de la irradiación de cada día del mes de febrero del 2024. Se puede identificar que la radiación solar está presente desde las 6:00 hasta las 18:00 del día. Tendiendo 5 horas aproximadamente como hora solar pico. Asimismo, se observa que el día 22 del mes presenta la mayor radiación solar a las 12:00 con un valor de  $620 W/m^2$ , por otra parte, se observa que el día 4 del mes presenta la menor radiación solar a las 12:00 registrando un valor de  $200 W/m^2$ . Lo que demuestra que el recurso solar es suficiente para el adecuado funcionamiento de los módulos fotovoltaicos.

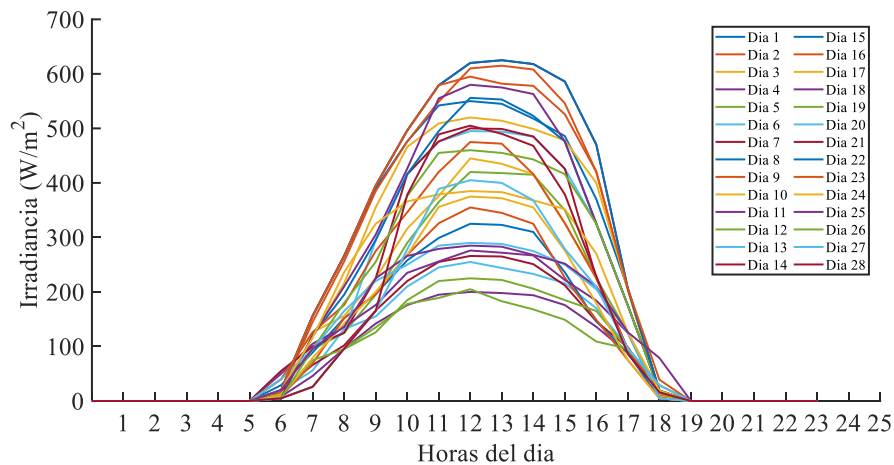


Figura 5-5: Medición del recurso solar

A continuación véase la Figura 5-6, la cual muestra las gráficas promedio de radiación solar de cada semana del mes de febrero, de esta forma se puede apreciar que la curva amarilla correspondiente a la semana 3 tiene mayor radiación solar que las demás semanas considerando que a las 12h00 el punto máximo de radiación solar promedio del mes de febrero registrado es de  $469 \text{ W/m}^2$  por otra parte se observa que la curva naranja correspondiente a la semana 2 tiene menor radiación solar a comparación de las demás semanas, de esta forma su punto máximo de radiación solar a las 12h00 es de  $374 \text{ W/m}^2$ , conociendo estos datos se puede mencionar que la radiación solar en el lugar destinado para el proyecto es suficiente para el funcionamiento adecuado de los paneles fotovoltaicos siendo aprovechable de forma efectiva desde las seis de la mañana hasta las seis de la tarde, cabe recalcar que en las horas de la tarde radiación solar alcanza sus puntos máximos siendo las 12h00 la hora donde la radiación solar es más alta según los datos registrados.

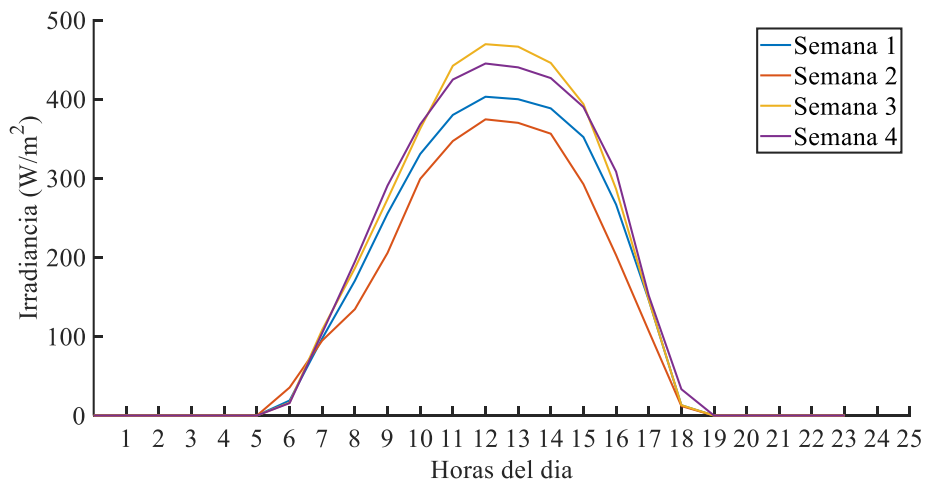


Figura 5-6: Irradiancia promedio de cada semana del mes

### 5.3 Evaluación del recurso eólico

Con los datos obtenidos mediante el anemómetro se puede realizar el análisis del recurso eólico como se muestra en la Figura 5-7, donde se observa el comportamiento de la velocidad del viento durante el mes de febrero del 2024. Además, se puede identificar que la mayor variación de la velocidad del viento se ubica desde las 8:00 hasta las 17:00 del día. Asimismo, se observa que el día 7 del mes presenta la mayor velocidad del viento de  $6,49 \text{ m/s}$  a las 13:00 horas, mientras que el día 26 del mes registra la menor velocidad del viento con un valor de  $0,39 \text{ m/s}$  a las 13:00 horas. Lo que demuestra que aún al ser el recurso eólico muy variable durante todo el día, es suficiente la velocidad del viento para el funcionamiento de un aerogenerador con eje vertical.

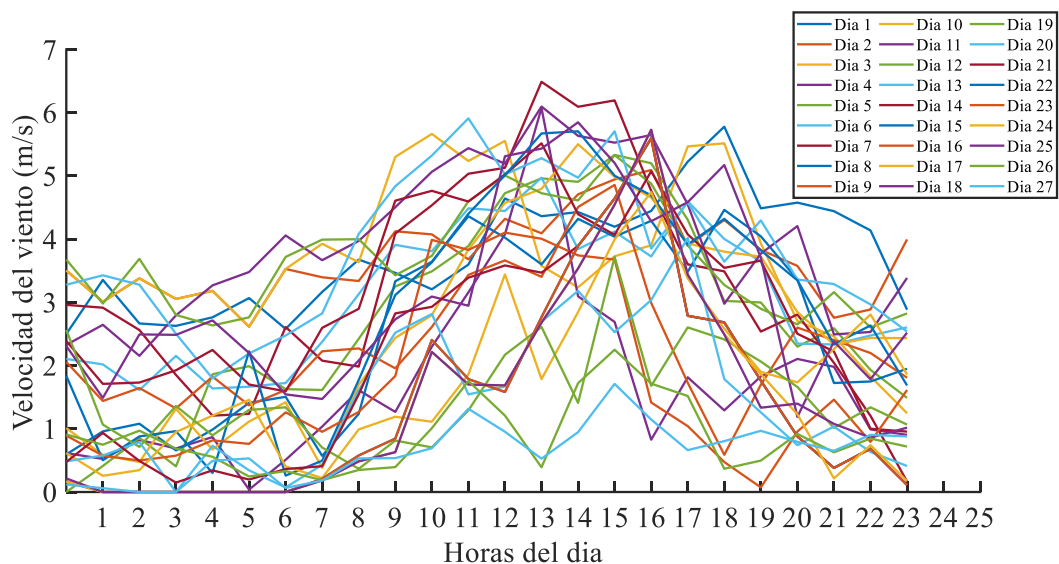


Figura 5-7:Medición del recurso eólico

Por consiguiente se muestra la Figura 5-8, la cual tiene 4 curvas promedio de velocidad del viento de las 4 semanas del mes de febrero, se observa que la curva naranja correspondiente a la semana 2 es la que tiene mayor velocidad del viento y teniendo su punto mínimo de  $1.90 \text{ m/s}$  y su punto máximo de  $4.93 \text{ m/s}$ , mientras que la curva de color morado es de la semana 4 del mes de febrero y esta se caracteriza por tener los valores de velocidad del viento más bajos de todo el mes, así su valor mínimo de  $0.11 \text{ m/s}$  y su valor máximo de  $4.44 \text{ m/s}$  lo cual representa variaciones grandes entre cada semana del mes en que se realizó las mediciones.

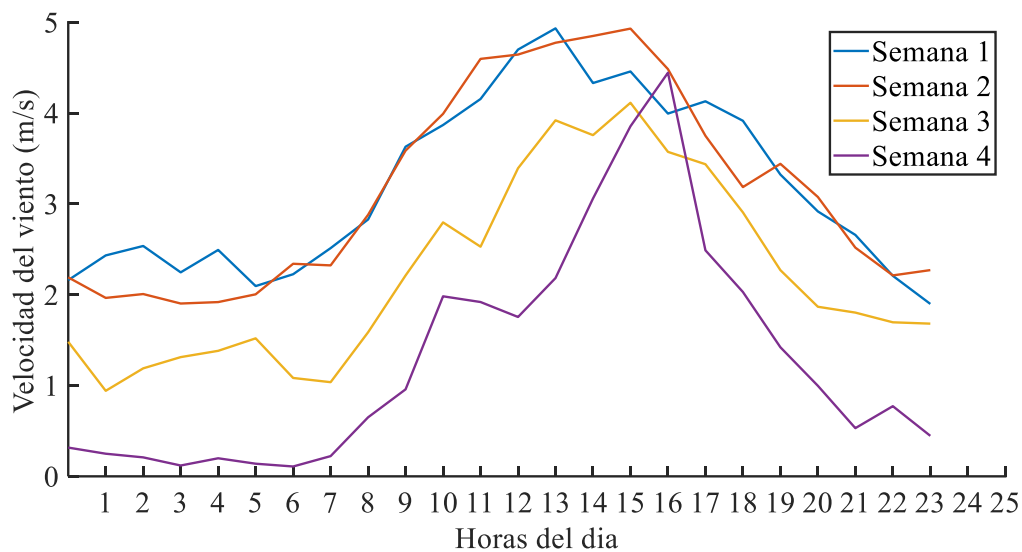


Figura 5-8: Velocidad del viento promedio de cada semana del mes

Al tener mediciones únicamente del mes de febrero del año 2024 tanto para el recurso eólico como solar, se procede a generar series sintéticas mediante el uso del Método de Montecarlo a partir del trabajo presentado en [7]. De esta forma se logra extrapolar los datos hasta obtener valores de velocidad del viento y radiación solar de todo el año 2024. Debido a que las series sintéticas guardan las características de la serie original, y al utilizar una distribución de probabilidad normal para la radiación solar y de Weibull para la velocidad del viento, es posible generar escenarios aleatorios incluyendo la variabilidad del recurso y por tanto obteniendo resultados más cercanos a la realidad.

La Figura 5-9, muestra la respuesta del Método de Montecarlo para la radiación solar, donde se puede evidenciar 10 curvas que representan la irradiancia promedio de los meses de marzo a diciembre del año 2024, de esta forma se puede observar el comportamiento similar a los datos medidos a partir del mes de febrero del 2024, donde se presenta un rango de  $403 W/m^2$  a  $432 W/m^2$  de radiación solar mensual a las 12:00 del día, manteniendo 5 horas aproximadamente de hora solar pico, valor suficiente para el funcionamiento adecuado de los módulos fotovoltaicos.

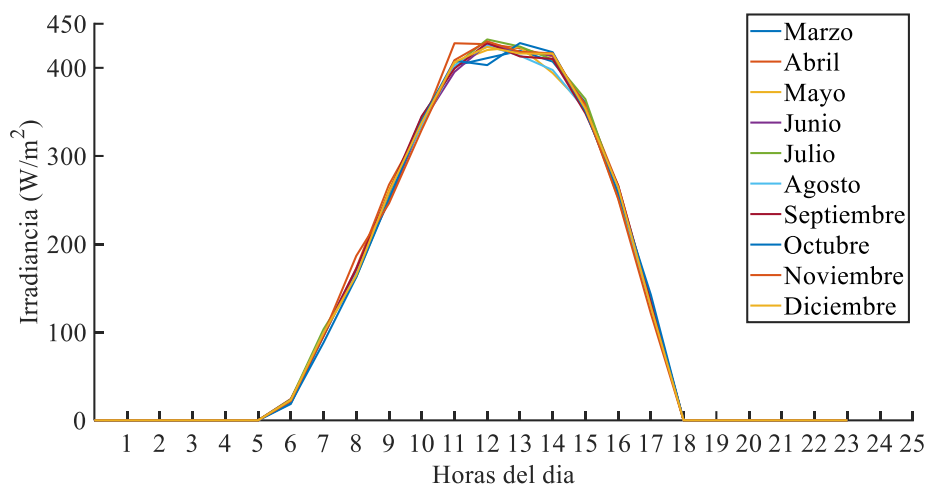


Figura 5-9: Proyección de la radiación solar promedio de los meses de marzo a diciembre del año 2024

Asimismo, la Figura 5-10, muestra la respuesta del Método de Montecarlo para la velocidad del viento, donde se puede evidenciar 10 curvas de velocidad del viento promedio proyectadas para los meses de marzo a diciembre del 2024, de esta forma se puede observar el comportamiento similar a los datos medidos a partir del mes de febrero del 2024. Además, se evidencia una variación en promedio del recurso eólico de  $1,38 \text{ m/s}$  a  $4,51 \text{ m/s}$  durante las 24 horas del día. En ese sentido es importante ubicar un aerogenerador con eje vertical que pueda funcionar con valores bajos de velocidad de viento, y así lograr mayor potencia eléctrica a partir del recuso eólico para el funcionamiento del sistema híbrido.

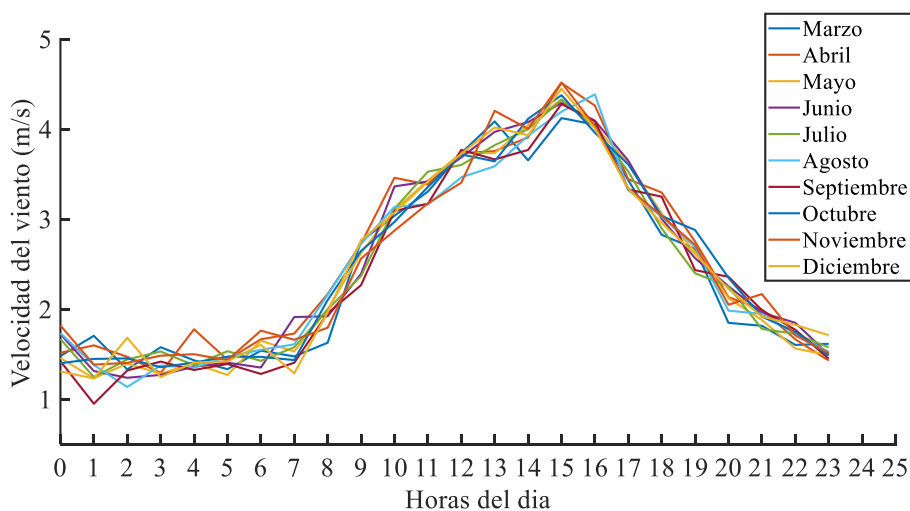


Figura 5-10: Proyección de la velocidad del viento promedio de los meses de marzo a diciembre del año 2024

## 5.4 Diseño del Sistema Híbrido

Para llevar a cabo el diseño del sistema híbrido se inicia con la creación de un esquema de los elementos que se utilizarán dentro del proyecto. Posteriormente, se realiza un estudio de cargas para asegurar un adecuado dimensionamiento del sistema. Los elementos del sistema fotovoltaico deben cumplir con la normativa IEC-61215 o IEEE-1262, así mismo los controladores de carga deben apagarse a la norma UL 1741 u otras aplicables como se detalla en [24]. Esto permitirá identificar componentes adecuados para el funcionamiento del sistema híbrido, y que estén disponibles en el mercado ecuatoriano para una futura implementación.

La Figura 5-11, muestra el esquema del sistema híbrido eólico-fotovoltaico, donde se puede evidenciar los elementos propuestos para llevar a cabo el diseño del proyecto, identificando que el sistema se compone de varias etapas como: generación de energía solar y/o eólica, conversión e inversión de energía, y almacenamiento de energía híbrida a través de baterías para el abastecimiento de la demanda.

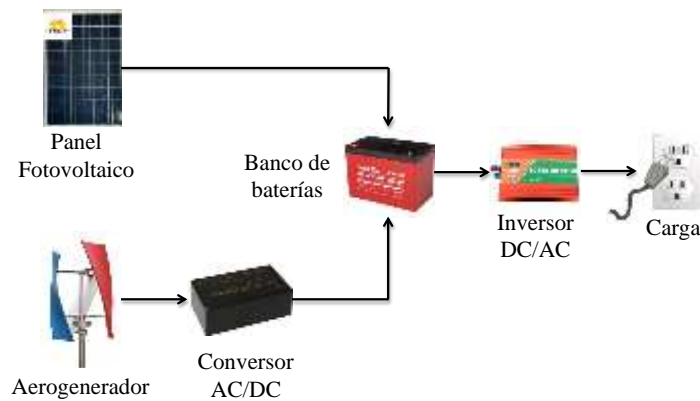


Figura 5-11: Esquema del sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Para realizar el dimensionamiento del sistema híbrido se lleva a cabo el levantamiento de cargas como se muestra en la Tabla 6, tomando como referencia los valores establecidos en [18], se ubica 1 tomacorriente doble y un tomacorriente USB de 200W cada uno, efectuando 5 horas de uso por cada elemento, y un factor de demanda de 0.5 se obtiene una energía total diaria de 2000 Wh/día, de esta forma se plantea la carga que se deberá abastecer para el sistema híbrido.

Tabla 6: Demanda del sistema híbrido

<b>Equipo</b>	<b>#</b>	<b>Potencia nominal (W)</b>	<b>Horas de uso al día (H)</b>	<b>Factor de demanda</b>	<b>Energía al día (Wh/día)</b>
Toma corriente doble	1	200	5	0,5	1000
Toma corriente USB	1	200	5	0.5	1000
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>400</b>	<b>10</b>	<b>0.5</b>	<b>2000</b>

Posteriormente se realiza el dimensionamiento de los equipos que se manejarán para el diseño del sistema híbrido en función a la demanda establecida, como se muestra en la Tabla 7. Donde se presenta las potencias y corrientes necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 7: Dimensionamiento del sistema híbrido

<b>Magnitud</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Energía diaria	2000	<i>Wh/día</i>
Potencia total con factor de utilización de 0.5	200	<i>W</i>
Voltaje sistema	120	<i>V</i>
Corriente hora	1.67	<i>Ah</i>
Corriente al día	16.67	<i>Ah/día</i>

En la Tabla 8, se muestran las características técnicas de los paneles fotovoltaicos y la turbina eólica seleccionados a partir del dimensionamiento de la demanda del sistema híbrido y de la normativa correspondiente, además identificando que estén disponibles en el mercado ecuatoriano y tengan un precio accesible para una futura implementación del proyecto.

Tabla 8: Características técnicas de paneles fotovoltaicos y aerogenerador

<b>Panel Fotovoltaico</b>	
Potencia:	110 <i>W</i>
Voltaje nominal:	12 VDC
Dimensiones:	1120 x 670 x 30 <i>mm</i>
Peso: 8.4 Kg	8.4 <i>Kg</i>
<b>Aerogenerador</b>	
Potencia nominal	> 300 <i>W</i>

Tensión nominal	96 V – 220 V
Diámetro del rotor	530 mm
Peso	14 Kg

Por otra parte, el inversor debe poder soportar picos de carga temporales, que suelen ser superiores a la carga nominal, un voltaje de entrada de 12 VDC y una salida de 100 – 120 VAC, este voltaje en función al sistema de almacenamiento de una batería de 12 VDC y 100 Ah. En este contexto es posible calcular la capacidad de descarga  $C_{DB}$  de la batería a partir de [12], como se muestra en la ecuación (5-1).

$$C_{DB} = \frac{V_B * I_B}{V_B * I_{consumida}} * P_{desc} \quad (5-1)$$

Donde:

$V_B$  es el voltaje de la batería

$I_B$  es la corriente de la batería [Ah]

$I_{consumida}$  es la corriente consumida por hora de la batería que se especifica en la Tabla 7

$P_{desc}$  es la profundidad de descarga de la batería

Mientras que, para calcular la capacidad de carga de la batería se emplea la ecuación ((5-2).

$$C_{CB} = \frac{C_B * EFIC}{I_{CT} - I_{consumida}} \quad (5-2)$$

Donde:

$C_{CB}$  es la capacidad de carga de la batería

$C_B$  es la capacidad de la batería en [Ah]

$EFIC$  es la eficiencia de la batería

$I_{CT}$  es la corriente de carga total

Para obtener esta corriente se utiliza la ecuación ((5-3).

$$I_{CT} = I_{CS} + I_{CE} \quad (5-3)$$

Donde:

$I_{CS}$  es la corriente de carga solar

$I_{CE}$  es la corriente de carga eólica.

Para garantizar un sistema con energía diaria de  $2000 \text{ Wh}$ , una potencia total de  $200 \text{ W}$  y un voltaje de entrada de  $12 \text{ VDC}$ , el inversor debe tener un factor de sobrecarga de 1.5 para mantener un margen de seguridad adecuado con la ecuación (5-4), se calcula la potencia del inversor.

$$P_{\text{inversor}} = P_t * f_s \quad (5-4)$$

Donde:

$P_t$  es la potencia total

$f_s$  es el factor de sobrecarga

Este dimensionamiento garantiza que el inversor pueda manejar cargas continuas y picos de manera eficiente y confiable. Asimismo, teniendo en cuenta un consumo de corriente por hora de  $1.67 \text{ A}$ , es necesario seleccionar una protección de  $20 \text{ A}$  garantizando un margen de seguridad del 125 % según [12]. Este dispositivo de protección asegurará que el sistema esté protegido contra sobre corrientes, mientras permite el funcionamiento normal y sin interrupciones del sistema híbrido.

### 5.5 Simulación del Sistema Híbrido

La simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico se lleva a cabo en el software Simulink de Matlab como se muestra en el diagrama de la Figura 5-12, donde se puede identificar el uso de un módulo fotovoltaico, una turbina eólica, un convertor AC/DC, una batería, un inversor DC/AC y una carga, para lo cual cabe recalcar que cada elemento de simulación se coloca en base a datos técnicos de elementos existentes en el mercado, para así tener un sistema más cercano a la realidad.

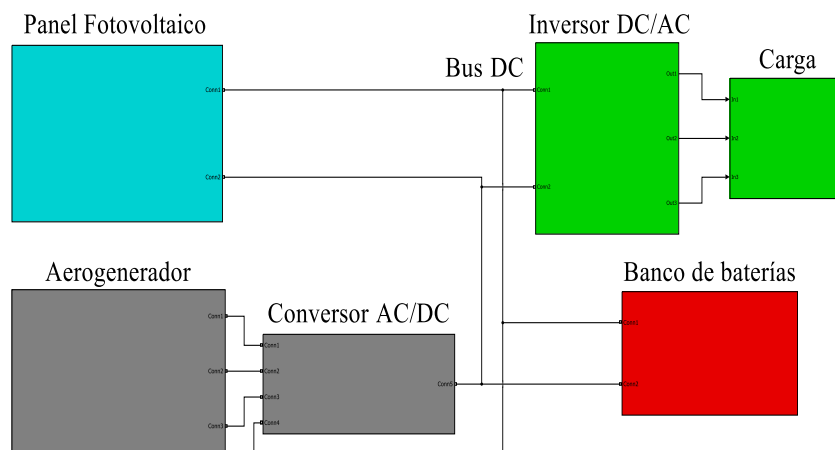


Figura 5-12: Diagrama de bloques del sistema híbrido en Simulink

A continuación, se muestra el módulo fotovoltaico empleado para la de esta forma se considera utilizar el elemento PV array de Simulink tal como se muestra en la Figura 5-13, este elemento tiene la capacidad de captar la radiación solar y convertirla en potencia útil, así como también voltaje y corriente DC.

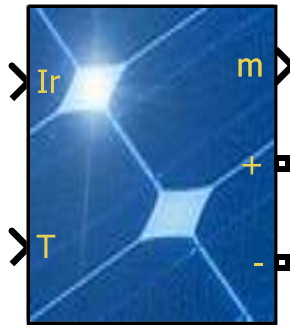


Figura 5-13: Panel fotovoltaico de la librería de Simulink (PV array)

En base al diseño realizado se emplea un panel fotovoltaico de  $110\text{ W}$ , de esta forma se presenta la Tabla 9, la cual muestra las características técnicas del módulo seleccionado.

Tabla 9: Características técnicas del panel fotovoltaico de Simulink

Marca:	Solar Tech
Material:	Policristalino
Potencia:	$110\text{ Wp}$
Voltaje nominal:	$12\text{ VDC}$
Voc/óptimo:	$21,4\text{ V}$
Voltaje máximo:	$17\text{ V}$
Isc/óptimo:	$7,1\text{ A}$
Corriente máxima:	$6,5\text{ A}$
Número de celdas:	36
Coefficiente de temperatura de Voc	$-0,36\%/deg.C$
Coefficiente de temperatura de Isc	$0,05\%/deg.C$

Hay que considerar que para 2 paneles fotovoltaicos las características técnicas son diferentes a comparación de tener 1 panel fotovoltaico, los parámetros que varían son la potencia máxima del panel, el voltaje máximo y el  $V_{oc}$ , mientras que la corriente máxima y la corriente de cortocircuito permanecen constantes, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Características técnicas de 2 paneles fotovoltaicos.

<i>Potencia:</i>	220 W
<i>V<sub>max</sub>:</i>	34 V
<i>I<sub>max</sub></i>	6,50 A
<i>V<sub>oc</sub></i>	42,80 V
<i>I<sub>sc</sub></i>	7,10 A

Por otra parte, se logra identificar que a medida que la radiación solar se reduce, la potencia del panel también se ve reducida, por lo que se puede definir que estos valores son directamente proporcionales, como se puede comprobar en las curvas de máxima potencia de los 2 paneles de 110 W propuestas en la Figura 5-14.

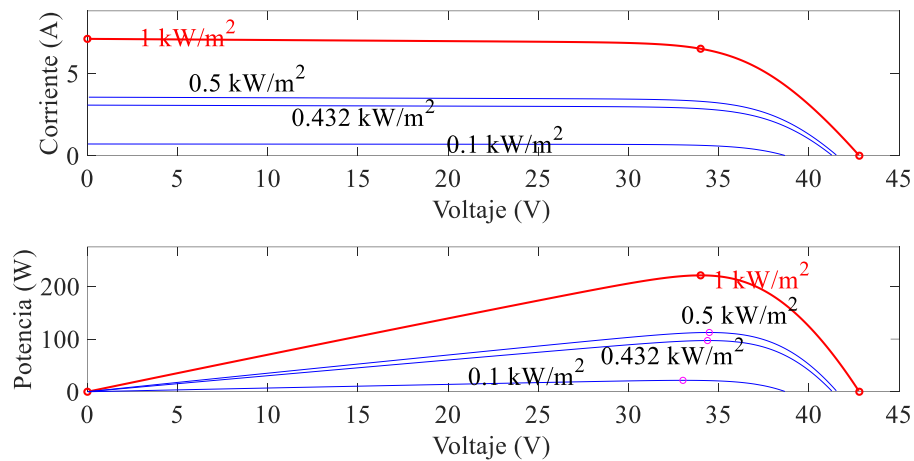


Figura 5-14: Curvas de máxima potencia para dos paneles de 110 W

A partir de las consideraciones planteadas mediante [25] es posible representar las ecuaciones que rigen al panel fotovoltaico, es así que para encontrar la potencia de salida se ocupa la ecuación (5-5), considerando que se mantiene constante la temperatura y el parámetro que varía es únicamente la radiación solar.

$$P_{m(G_m)} = FF * V_{oc(G_m)} * I_{sc(G_m)} \quad (5-5)$$

Donde,  $FF$ , es el factor de forma del panel,  $V_{oc(G_m)}$ , es la tensión a circuito abierto a un nivel de irradiancia,  $I_{sc(G_m)}$ , es la intensidad de cortocircuito a un nivel de irradiancia. Para encontrar el valor del  $V_{oc(G_m)}$  al variar la radiación solar se emplea la ecuación (5-6).

$$V_{oc(G_m)} = V_{oc(nom)} + \frac{n * k_b * T}{q} \ln \left( \frac{G_m}{G_{nom}} \right) \quad (5-6)$$

Donde,  $V_{oc(nom)}$ , es la tensión a circuito abierto nominal del panel,  $n$ , es el factor de idealidad del panel,  $k_b$ , es la constante de Boltzmann de  $(1.381 \cdot 10^{-23} J/K)$ ,  $q$  es la carga del electrón de  $(1.602 \cdot 10^{-19} C)$ ,  $G_{nom}$ , es irradiancia en condiciones estándares de medida de  $(1000 W/m^2)$  y  $G_m$ , es la irradiancia que incide sobre el módulo fotovoltaico.

Por consiguiente, se necesita encontrar el valor de la corriente de cortocircuito  $I_{sc(G_m)}$  para lo cual se emplea la ecuación (5-7).

$$I_{sc(G_m)} = I_{nom} * \frac{G_m}{G_{nom}} \quad (5-7)$$

Donde,  $I_{nom}$ , es la corriente nominal del modulo fotovoltaico. Para determinar el factor de forma del panel fotovoltaico  $FF$  se lo realiza mediante la ecuación (5-8).

$$FF = \frac{P_{nom}}{V_{oc(G_m)} * I_{sc(G_m)}} \quad (5-8)$$

Donde,  $P_{nom}$ , es la potencia nominal del panel fotovoltaico. Otro aspecto importante es la resistencia interna del panel fotovoltaico que se obtiene a partir de la ecuación (5-9), Donde  $V_{max}$ , es la tensión máxima nominal del panel.

$$R = \frac{P_{nom}^2}{V_{max}} \quad (5-9)$$

Para el bloque denominado aerogenerador se toma en cuenta el elemento Wind Turbine de Simulink tal como se muestra en la Figura 5-15, este elemento funciona a partir del aprovechamiento de la velocidad del viento para así obtener potencia y torque que permitan acoplarse a un generador y obtener potencia eléctrica, así como también voltaje y corriente AC.

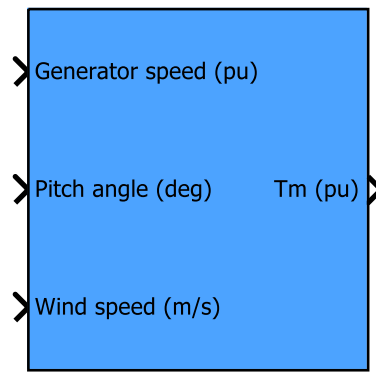


Figura 5-15: Turbina eólica de la librería de Simulink (PV array)

Por medio del diseño presentado anteriormente se considera colocar una turbina eólica de  $3 \text{ kW}$  de potencia nominal, así es como se presenta la Tabla 11, que muestra las características técnicas del elemento.

Tabla 11: Características técnicas de la turbina eólica de Simulink

Potencia nominal de salida	3000 W
Velocidad del viento nominal	11 m/s
Velocidad de viento inicial	2 m/s
Velocidad de corte	14 m/s
Velocidad de rotación base	1,5 pu
Velocidad angular de rotación	31,41 m/s
Potencia Max a la velocidad del viento	1 pu
Velocidad de rotación base	1,5 pu
Angulo beta	0 grados

A continuación, en la Figura 5-16, se puede identificar las curvas características de la turbina eólica, evidenciado que puede generar potencia con valores bajos de velocidad del viento para diferentes curvas de funcionamiento.

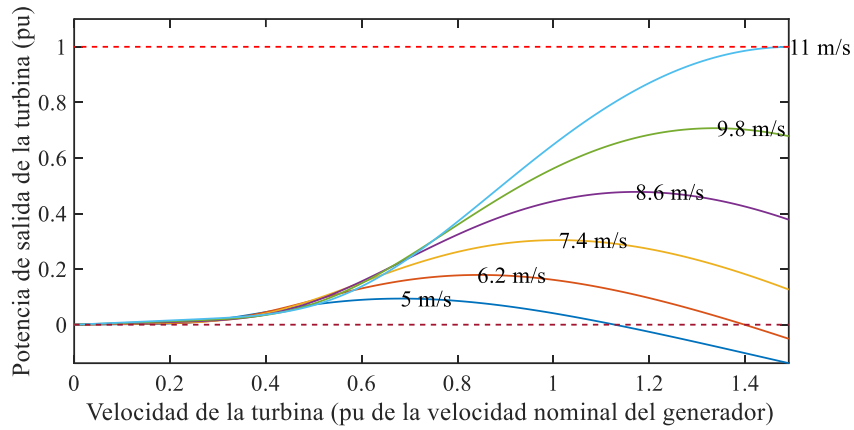


Figura 5-16: Potencia de salida en función a la velocidad del viento

A partir de [26], es posible representar las ecuaciones de la turbina eólica, de esta manera se puede encontrar el valor de la potencia de salida de la turbina de acuerdo con la variación de la velocidad del viento mediante la ecuación (5-10).

$$P_m = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * V^3 \quad (5-10)$$

Donde  $C_p(\lambda, \beta)$ , es el coeficiente de rendimiento de la turbina,  $\rho$ , es la densidad del aire considerándose una constante del sistema,  $A$ , es el área del rotor,  $V$ , es la velocidad del viento, para obtener el valor de  $C_p(\lambda, \beta)$  se utiliza la ecuación ((5-11).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 * \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 * \beta - C_5 \right) * e^{\frac{-C_6}{\lambda_i}} \quad (5-11)$$

Donde,  $\beta$ , es el ángulo de inclinación de la pala,  $\lambda$ , es la relación entre la velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_5$  y  $C_6$  son constantes del sistema. Para obtener el valor de  $\lambda_i$ , se emplea la ecuación (5-12).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (5-12)$$

Además, para obtener el valor de  $\lambda$  de la turbina eólica, el torque mecánico  $T$  y la velocidad angular  $w_m$ , se utiliza las ecuaciones ((5-13), (5-14) y (5-15) según corresponda.

$$\lambda = \frac{w_m * R}{V} \quad (5-13)$$

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (5-14)$$

$$\omega_m = \frac{\lambda * V}{R} \quad (5-15)$$

Donde  $\omega_m$ , es la velocidad de rotación,  $R$ , es el radio de la turbina,  $P_m$ , es la potencia de salida de la turbina y  $\lambda$ , es la velocidad angular de la turbina.

### 5.6 Generador eléctrico

A su vez se requiere de otros elementos que sustenten el sistema híbrido como el generador eléctrico, el cual tiene la función de aprovechar la potencia y el torque producido por la turbina eólica y por ende producir potencia eléctrica, este elemento se acopla a la salida de la turbina eólica, y cuenta con 4 polos tipo rotor cilíndrico, obteniendo una potencia nominal de 3300 W, tal como se puede ver en la Figura 5-17.

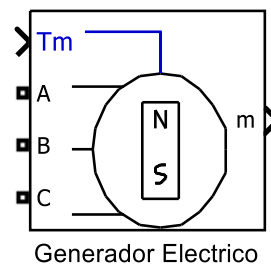


Figura 5-17: Modelo de batería generador eléctrico en Simulink

Este generador se acopla a la salida de la turbina eólica y se conectan entre si al bus denominado Tm en el modelo presentado, para lo cual se muestra en la Tabla 12, las características técnicas obtenidas de Simulink.

Tabla 12: Características técnicas del generador eléctrico

Potencia nominal	3,33 kW
Tipo	Trifásico
Forma de onda	Sinusoidal
Tipo de rotor	Cilíndrico
Numero de polos	4

Para obtener la potencia nominal del generador eléctrico en base a la potencia nominal de la turbina eólica se emplea la ecuación (5-16).

$$P_E = \frac{P_{nom}}{F_p} \quad (5-16)$$

Donde:  $P_{nom}$  es la potencia nominal del aerogenerador,  $F_p$  es el factor de potencia que considerara para este caso de 0,9.

### 5.7 Sistema de almacenamiento

Con respecto al sistema de almacenamiento se considera una batería de ion litio mostrada en la Figura 5-18, la cual se conecta a la salida de los paneles fotovoltaicos y de la turbina eólica con la finalidad de cargarse mediante ERNC, se debe tener en cuenta que la batería es de 12 VDC y tiene una capacidad de 100 Ah.

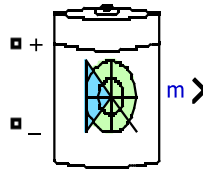


Figura 5-18: Modelo de batería en Simulink

Se muestra en la Tabla 13, las características de la batería que se utiliza para el sistema híbrido, de esta manera al ser una batería de 12 VDC se necesita que todos los elementos de transformación tales como el inversor y el convertidor deben ser del mismo nivel de voltaje para que el sistema ande de forma adecuada y eficiente.

Tabla 13: Características técnicas de la batería

Tipo	Ion Litio
Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal	100 Ah
Estado inicial de carga	100%
Voltaje completamente cargado	13.96 V

## 5.8 Inversor DC/AC

En el sistema se considera un inversor DC/AC, el cual está conectado al sistema de almacenamiento, este tiene la capacidad de convertir la tensión continua a tensión alterna necesaria para que pueda funcionar la carga. El modelo del inversor se presenta en la Figura 5-19, el cual está constituido por un banco de 4 mosfet y un filtro RLC para obtener una señal sinusoidal pura tanto de voltaje y corriente, además cuenta con un transformador de 500 W de potencia nominal, un voltaje de 12 VDC en el lado primario y 120 VAC en el lado secundario, características necesarias para asegurar el abastecimiento de la carga.

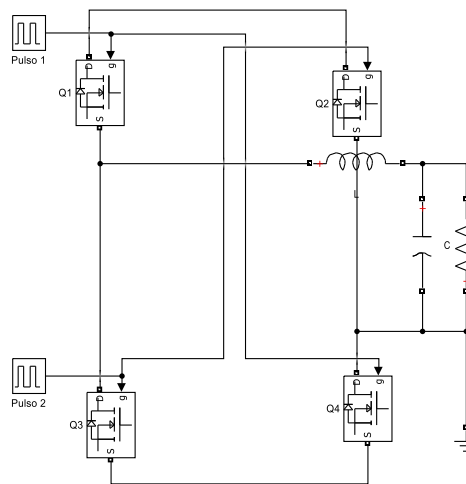


Figura 5-19: Modelo del inversor DC/AC

Conociendo esto se muestra en la Tabla 14 las características internas que definen el inversor que se empleara en el sistema híbrido.

Tabla 14: Características técnicas del inversor DC/AC

Tipo	Banco de Mosfet
Numero de Mosfet	4
Voltaje	12 VDC/120VAC
Potencia nominal	500 W
Frecuencia	60 Hz
Voltaje devanado primario	12 VDC
Voltaje devanado secundario	120 VAC

Considerando estos aspectos el funcionamiento del inversor se basa en el control PWM es decir la modulación de ancho de pulsos para la señal de voltaje y corriente, de esta forma se considera

para el pulso uno un tiempo de  $1/60$  lo cual es el inverso de la frecuencia de  $60\text{ Hz}$ , además de un ancho del pulso (% del periodo) de 60, es decir que se toma un 60% del periodo total, y además de un retraso de fase de cero lo que quiere decir que la señal de pulso comienza inmediatamente al inicio del periodo, sin ningún retraso y para el pulso 2 un tiempo de  $1/60$ , un ancho de pulso de 60, y un retraso de fase de  $1/60/2$  lo que significa que cada ciclo de la señal PWM está retrasado 8,33 milisegundos respecto al inicio del ciclo, para lo cual al activarse el bloque denominado pulso 1 El Mosfet Q1 y Q4 se activarán mientras que los Mosfet Q2 y Q3 pasaran a un estado de inactividad que variará de acuerdo con el tiempo de duración del pulso recibido por el PWM, permitiendo así el paso de voltaje desde la fuente DC hasta la respectiva carga, ahora el siguiente cambio de pulso es cuando el bloque denominado pulso 2 se activa donde contrario a lo anterior desactiva los Mosfet Q1 y Q4 mientras activa los Mosfet Q2 y Q3. Al medir la salida de este circuito mediante un osciloscopio se obtiene una señal cuadrada producto de las conmutaciones del voltaje directo, de esta forma se emplea un filtro RLC, el cual permite obtener una señal sinusoidal de voltaje y corriente que se necesita para alimentar la carga.

### 5.9 Convertidor AC/DC

Asimismo, se considera un conversor AC/DC trifásico conectado al generador eléctrico, como se muestra en la Figura 5-20, el cual está conformado de seis diodos los cuales tienen la función de realizar la conversión AC/DC, además de un capacitor y resistor que realizan la filtración de la señal, cabe recalcar que este proceso de conversión se lo realiza para conectar la turbina eólica a las baterías ya que éstas funcionan con voltaje DC.

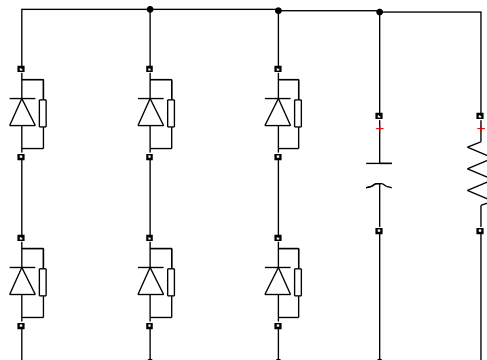


Figura 5-20 :Modelo del conversor AC/DC

Para el modelo del convertor se presenta la Tabla 15, la cual contiene las características de los elementos internos.

Tabla 15: Características técnicas del convertor AC/DC

Tipo	Trifásico
Estructura	Puente de diodos
Voltaje	12 <i>VCD</i>
Numero de diodos	6

### 5.10 CALCULO DE LOS FILTROS PARA EL INVERSOR Y CONVERTOR

Para este apartado se decide colocar un filtro RLC para el inversor, de esta forma se presenta las ecuaciones características para calcular la capacitancia mediante la ecuación (5-17) e inductancia del filtro mediante la ecuación (5-18).

$$C = \frac{Q}{2\pi * k * f_c * R} \quad (5-17)$$

$$L = \frac{R}{\pi * k * f_c} \quad (5-18)$$

Donde:

$Q$ : Factor de calidad

$k$ : Constante de aproximación

$f_c$ : Frecuencia de corte

$R$ : Resistencia

Para lo cual se considera emplear el método de aproximación de Butterworth del autor [27], presentado en la Tabla 16. Para obtener los valores del factor de calidad y de la constante de aproximación.

Tabla 16: Métodos de aproximación para el factor Q y k [27]

Aproximación	Factor de calidad Q	Constante k
Butterworth	0.7071	1
Chebyshev	0.7247	0.9774
Chebyshev	0.7673	0.9368
Chebyshev	0.8093	0.9098
Chebyshev	0.8638	0.886
Chebyshev	0.9564	0.8623
Bessel	0.5771	12.754

De esta forma se considera una Frecuencia de corte superior a 60 *hz* en este caso se selecciona de 87 *hz* para obtener los valores adecuados de capacitancia e inductancia tal como se muestra a continuación:

Para el cálculo de la capacitancia se emplea la ecuación (5-17) con una resistencia de 4,31  $\Omega$  y el método de aproximación de Butterworth con un factor Q de 0.7071 y una constante de aproximación de 1

$$C = \frac{0.7071}{2\pi * 1 * 87 * 4.31}$$

$$C = 300,12 \mu\text{F}$$

Por consiguiente, se aplica a ecuación (5-18) para calcular la inductancia del filtro considerando una resistencia de 4,31  $\Omega$  y una constante de aproximación de 1.

$$L = \frac{4.31}{\pi * 1 * 87}$$

$$L = 15,76 \text{ mH}$$

Por otra parte, se consideró emplear un filtro RC para el convertidor AC DC, de esta forma se utiliza los mismos parámetros empleados en el cálculo anterior a diferencia de que ahora se tiene una resistencia de  $500 \Omega$ , y además de la ecuación (5-17) para calcular la capacitancia

$$C = \frac{0.7071}{2\pi * 1 * 87 * 500}$$

$$C = 2,58 \mu\text{F}$$

## **6 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En ese apartado se muestran los resultados del proyecto investigativo iniciando con la evaluación del recurso eólico y solar existente en el lugar destinado para el proyecto, así también cálculos para el diseño de sistema y los parámetros de salida que permiten abastecer la carga planteada en la simulación

### **6.1 Evaluación del recurso eólico y solar**

De acuerdo con el estudio meteorológico realizado en el lugar destinado para el proyecto se presenta la Figura 6-1, la cual muestra el comportamiento de la radiación solar promedio de todo el mes de febrero, se observa que existe recurso solar aprovechable desde las 6h00 hasta las 18h00, de esta forma a las 12h00 el valor de radiación solar es de  $426 \text{ W}/\text{m}^2$  siendo el valor más alto en todo el mes, por otra parte, se presenta la Figura 6-2, la cual muestra el comportamiento promedio de la velocidad del viento de todo el mes de febrero, se aprecia que en las 24 horas del día existe recurso eólico, además que sus valores más altos se dan en la tarde llegando hasta los  $4,30 \text{ m}/\text{s}$ , considerando estos valores obtenidos se pudo determinar que el lugar donde se colocó los elementos de medición es adecuado ya que tiene el recurso solar suficiente para que los paneles produzcan la potencia necesaria para el sistema híbrido y por ende el abastecimiento de la carga.

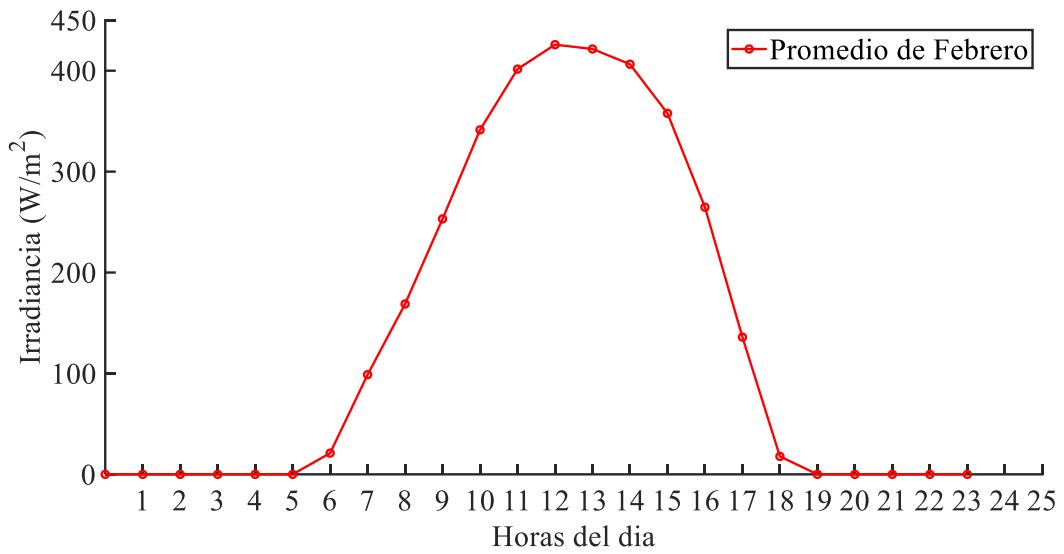


Figura 6-1: Irradiancia promedio del mes de febrero

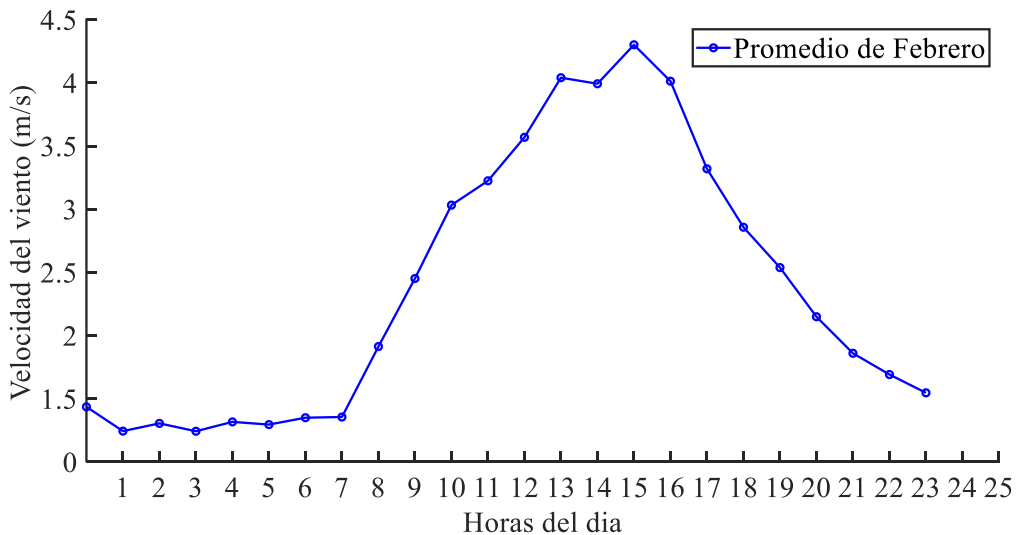


Figura 6-2: Velocidad del viento promedio del mes de febrero

Además se muestra la Figura 6-3, la cual muestra el comportamiento de la radiación solar promedio proyectada para el año 2024, se observa que existe recurso solar aprovechable desde las 6h00 hasta las 18h00, de esta forma a las 12h00 el valor de radiación solar es de  $422 \text{ W/m}^2$  siendo el valor más alto en el periodo analizado de marzo a diciembre, por otra parte, se presenta la Figura 6-4, la cual muestra el comportamiento promedio de la velocidad del viento de marzo a diciembre, se aprecia que en las 24 horas del día existe recurso eólico, además que sus valores más altos se dan en la tarde llegando hasta los  $4,33 \text{ m/s}$ ., para lo cual se aprecia que los datos medidos del mes de febrero y proyectados tienen una variación pequeña

lo cual se puede decir que a lo largo de todo el año se tendrá un recurso eólico y solar adecuado para el funcionamiento del sistema híbrido.

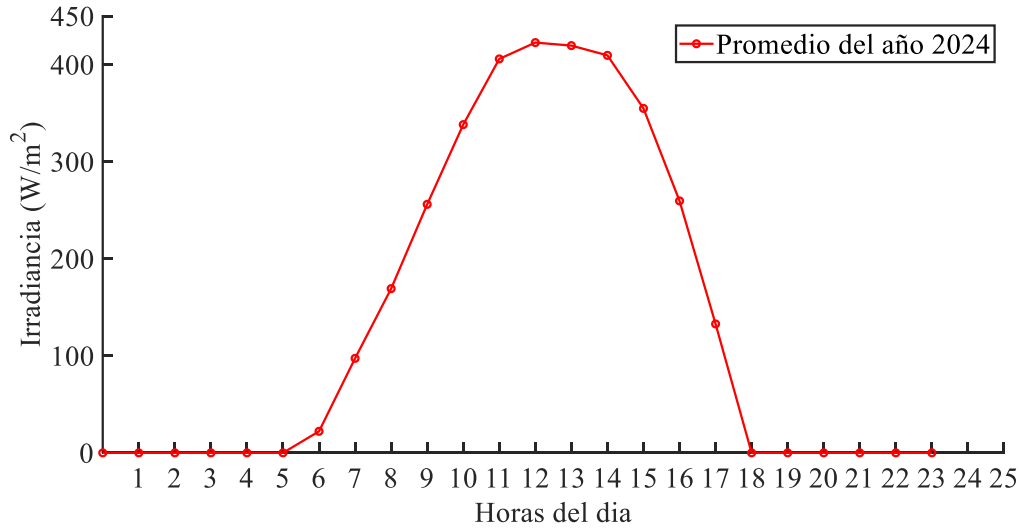


Figura 6-3: Irradiancia promedio proyectada de los meses de marzo a diciembre

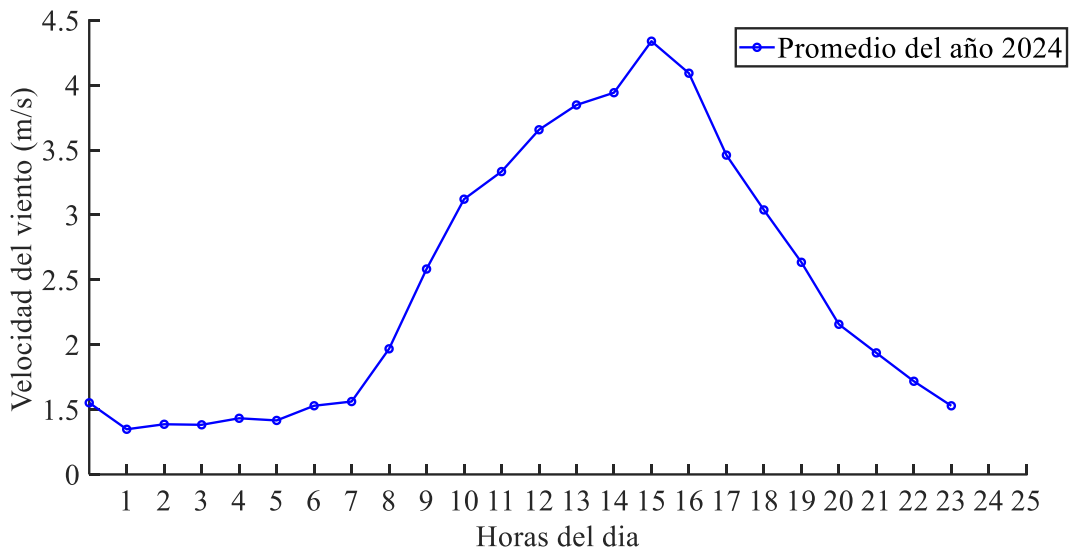


Figura 6-4: Velocidad del viento promedio del me marzo a diciembre

## 6.2 Cálculos de diseño del sistema híbrido

Prosiguiendo con los resultados de la investigación en la Tabla 17, se muestran las características técnicas que debe tener la batería en función a los cálculos realizados con las ecuaciones (5-1) y (5-2).

$$C_{DB} = \frac{12 * 100}{12 * 1.67} * 1$$

$$C_{DB} = 60 h$$

$$C_{CB} = \frac{100 * 0.90}{5.83 - 1.67}$$

$$C_{CB} = 21.62 h$$

Destacando un tiempo de carga de 21.62 horas aproximadamente, lo que corresponde a una alta capacidad de absorción de energía de la batería en un periodo de tiempo relativamente corto. Asimismo, un tiempo de descarga de aproximadamente 60 horas lo que significa que el sistema de acumulación de energía tiene una alta capacidad de retención de energía, y puede proporcionar una autonomía energética significativa al sistema híbrido en estudio.

Tabla 17: Características técnicas de la batería

Magnitud	Valor	Unidad
Capacidad batería	100	Ah
Eficiencia	90	(%)
Voltaje de los 2 paneles	24	V
Corriente carga solar	5,75	A
Corriente carga eólico	0,08	A
Corriente carga total	5,83	A
Potencia batería	1200	Wh
Corriente consumo	1.67	A
Tiempo de carga	21.62	horas
Tiempo de descarga	60	horas

Asimismo, para que el sistema funcione correctamente y convierta eficientemente la energía generada se utiliza la ecuación (5-4).

$$P_{inversor} = 200 * 1.5$$

$$P_{inversor} = 300 W$$

Donde se requiere de un inversor con una potencia mínima de 300 W, pero en este caso se selecciona uno de 500 W ya que es el que existe en el mercado, este debe ser capaz de manejar la carga máxima esperada sin sobrecalentarse ni reducir la eficiencia. Además, el inversor debe tener una eficiencia superior al 90%, lo que significa que debe convertir al menos el 90% de la

CC generada por los paneles solares o las turbinas eólicas en CA utilizable con una pérdida mínima en el proceso de conversión. La alta eficiencia es esencial para maximizar la energía producida y minimizar el desperdicio, contribuyendo así a una operación más económica y sostenible del sistema. Se recomienda elegir un inversor de una marca reconocida con certificación para garantizar su calidad y durabilidad para garantizar un funcionamiento confiable a largo plazo.

Una vez seleccionados los elementos del proyecto se presenta el diseño del sistema híbrido a través del Anexo 3, donde se muestra la estructura integrada por paneles fotovoltaicos, una turbina eólica de eje vertical y un centro de carga, de esta forma todo este conjunto de elementos se coloca en un poste de 3 metros de altura. Para lo cual la turbina eólica se coloca en la parte media-superior de la estructura para obtener su mayor eficiencia, mientras que los paneles solares están ubicados a los costados de la turbina con una inclinación de  $15^\circ$  para efectos de mantenimiento, por consiguiente, en el centro de carga que está en el interior de la estructura está incluido los sistemas de inversión DC/AC, almacenamiento y protección. Con respecto a los tomacorrientes están dispuestos en la parte inferior del poste para que el usuario haga uso de los mismos.

Finalmente en el Anexo 4, se muestra el diagrama eléctrico del sistema híbrido donde se observa las conexiones que se deben realizar para llevar a cabo el correcto funcionamiento del proyecto, cabe recalcar que los paneles solares tienen polaridad al ser salidas de corriente continua, en ese sentido se han definido como positivo el color rojo y negativo el color azul, asimismo para la salida del inversor hacia la carga se tiene corriente alterna por lo que se han definido fase y neutro representados por el color rojo y azul respectivamente.

### **6.3 Evaluación de los paneles fotovoltaicos**

A continuación, se presentan las características de cada elemento dentro de la simulación, de tal manera que el modelo de los módulos fotovoltaicos se establece en la Figura 6-5, donde la salida de potencia depende de los datos de entrada correspondientes a la radiación solar y la temperatura. De esta forma para obtener la potencia nominal de los dos paneles se usa como entrada  $25^\circ\text{C}$  de temperatura y  $1000\text{ W/m}^2$  de radiación solar, obteniendo como resultado un voltaje de  $34\text{ V}$ , una corriente de  $6,5\text{ A}$ , y una potencia de  $221\text{ W}$ .

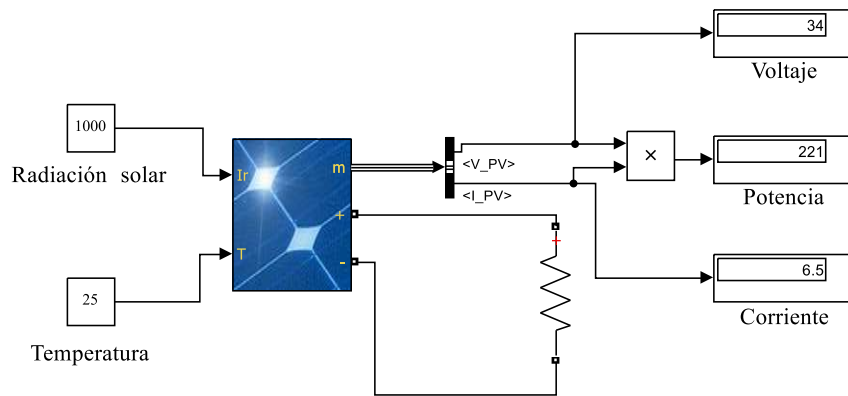


Figura 6-5: Modelo de panel fotovoltaico con valores nominales en Simulink

En este caso se debe calcular únicamente la resistencia para encontrar el valor nominal de potencia empleando la ecuación (5-9).

$$R = \frac{221^2}{34}$$

$$R = 5,23 \Omega$$

Al colocar esta resistencia en la simulación y además una radiación solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  se logra obtener la potencia nominal de los dos paneles fotovoltaicos.

Por otra parte, el caso particular que se presenta se ha establecido un valor de radiación solar de  $432 \text{ W/m}^2$  a partir de la evaluación de recurso solar en la sección 5.1, y considerado un control de temperatura a  $25^\circ\text{C}$  lo que permite obtener los siguientes resultados: un voltaje de  $34,38 \text{ V}$ , una corriente de  $2,82 \text{ A}$ , y una potencia de  $97,2 \text{ W}$  tal como muestra la Figura 6-6.

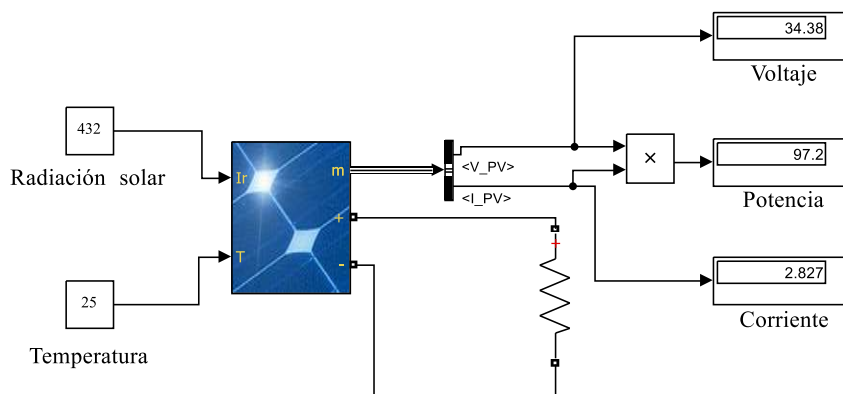


Figura 6-6: Modelo de panel fotovoltaico en Simulink considerando  $432 \text{ W/m}^2$

Para comprobar estos resultados al tener  $432 \text{ W/m}^2$  de radiación solar se emplea las ecuaciones mostradas en la sección 5.5. De esta forma se debe conocer las constantes que inciden en las ecuaciones características del panel y estas se reflejan en la Tabla 18.

Tabla 18: Constantes para el cálculo de parámetros del panel fotovoltaico

$T$	25
$n$	1
$Kb$	$1,38E - 23$
$q$	$1,60E - 19$
$G_{nom}$	1000

Para lo cual se inicia calculando el voltaje de circuito abierto  $V_{oc(G_m)}$  empleando la ecuación (5-6), ahora se considera un nuevo valor de radiación solar diferente a la nominal la cual se ha establecido en el estudio meteorológico realizado y su valor es de  $432W/m^2$  y un  $V_{oc(nom)} = 258,20 V$

$$V_{oc(G_m)} = 42,80 + \frac{1 * 1,38E^{-23} * 25}{1,602E^{-19}} \ln\left(\frac{432}{1000}\right)$$

$$V_{oc(G_m)} = 42,80 V$$

De esta forma se logra obtener el valor de voltaje de circuito abierto con la nueva radiación solar establecida para los dos paneles

Ahora se procede a calcular el valor de  $I_{sc(G_m)}$  mediante la ecuación (5-7), considerando el valor de circuito abierto ya calculado y además de  $I_{nom}$  de  $7,10 A$  tal como se muestra a continuación.

$$I_{sc(G_m)} = 7,10 * \frac{432}{1000}$$

$$I_{sc(G_m)} = 3,07 A$$

Ahora se necesita calcular el factor de forma del panel fotovoltaico para lo cual se lo hace mediante la ecuación (5-8).

$$FF = \frac{97,19}{42,80 * 3,07}$$

$$FF = 0,74$$

Se obtiene la potencia nominal de los dos paneles fotovoltaicos con la ecuación (5-10).

$$P_{m(G_m)} = 0,74 * 42,80 * 3,07$$

$$P_{m(G_m)} = 97,23 \text{ V}$$

Además, se requiere calcular la resistencia que requieren los dos paneles fotovoltaicos empleando la ecuación (5-9).

$$R = \frac{34,38^2}{97,19}$$

$$R = 12,16 \Omega$$

De esta forma se comprueba los resultados obtenidos mediante la simulación realizada en el software Simulink variando la radiación solar y manteniendo constante la temperatura.

### 6.1 Evaluación de los paneles fotovoltaicos variando la temperatura

Por otra parte, se muestra un análisis de los parámetros de salida, pero ahora manteniendo constante la radiación solar y variando la temperatura, para lo cual se considera que la temperatura base es la temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ , de esta forma se varía a temperaturas bajas de la temperatura ambiente en este caso de  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$  y temperaturas arriba de la ambiente de  $35^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , es así que al realizar la simulación en el software Simulink se muestran los valores resultantes de los paneles fotovoltaicos tal como se especifica la Tabla 19.

De esta forma se evidencia que, al aumentar la temperatura, los parámetros de salida de los paneles fotovoltaicos reducen, mientras que, al disminuir la temperatura, los parámetros de los paneles aumentan tal como se presenta a continuación:

**Aumento de Temperatura:** El incremento en la temperatura disminuye el voltaje de salida del panel, lo que resulta en una disminución de la potencia generada.

**Disminución de Temperatura:** La reducción de la temperatura aumenta el voltaje, lo que hace que la potencia generada aumente.

En función a lo presentado se puede decir que la temperatura influye directamente en la excitación de los electrones que posee el panel fotovoltaico mas no en la potencia de salida es así que para tener mayor eficiencia de los paneles se requiere de bajas temperaturas.

Tabla 19: Parámetros de salida al variar la temperatura de los paneles fotovoltaicos

Temperatura	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
5	102,7	35,35	2,9
15	100,8	35,01	2,87
25	97,2	34,38	2,82
35	92,338	33,52	2,75
50	83,89	31,94	2,62

## 6.2 Evaluación de la turbina eólica

Por otra parte, se presenta el modelo de la turbina eólica en la Figura 6-7, donde la salida de potencia depende de los datos de entrada de la velocidad del viento y el ángulo beta. Es así que para obtener la potencia nominal de la turbina se usa una velocidad del viento de  $11 \text{ m/s}$ , y un ángulo beta de  $0^\circ$ , obteniendo como salida una potencia de es  $3000 \text{ W}$ .

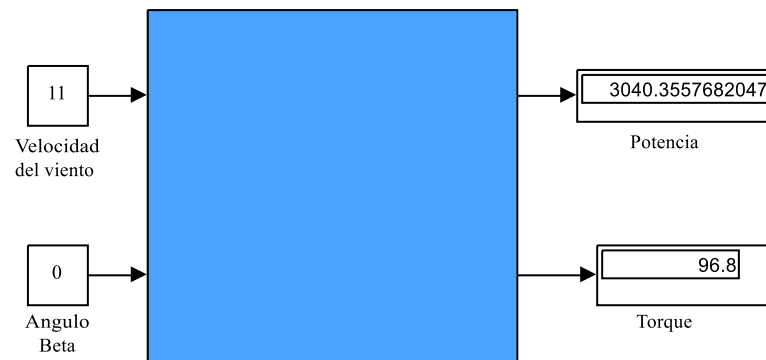


Figura 6-7:Modelo de turbina eólica en Simulink empleando valores nominales

Mientras que, para este caso en particular se debe introducir los valores de velocidad del viento promedio de  $4,51 \text{ m/s}$  establecidos en la sección 5.1, y un ángulo  $\beta = 0^\circ$  donde se obtiene una potencia de salida de  $277,22 \text{ W}$ .

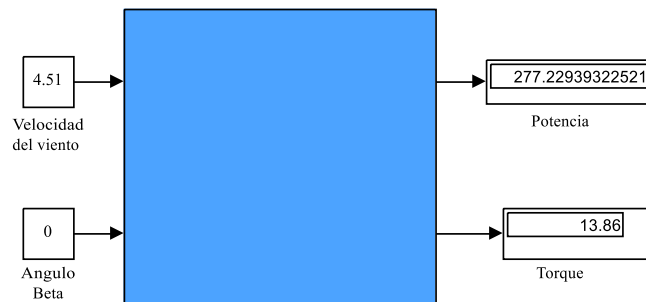


Figura 6-8:Modelo de turbina eólica en Simulink

Para comprobar los resultados obtenidos se debe aplicar las ecuaciones mostradas en la sección 5.5 de esta forma como datos de entrada se muestra la Tabla 20.

Tabla 20: Datos de entrada para el cálculo de parámetros de la turbina eólica

Velocidad del Viento	4,51 m/s
Radio de la turbina	2 m
Velocidad Angular	20 m/s
Angulo beta	0
Densidad del aire	1,225
Área de la turbina	12,57

Aparte de los datos de entrada se debe considerar ciertas constantes referidas por el autor [26], las cuales se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Constantes para el cálculo del Cp

C1	0,5
C2	116
C3	0,4
C5	5
C6	21

De esta forma se inicia calculando  $\lambda$  la cual representa es la relación de velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento se emplea la ecuación (5-13).

$$\lambda = \frac{20 * 2}{4,51}$$

$$\lambda = 8,9$$

Por consiguiente, se necesita el valor de  $\lambda_i$  el cual se representa mediante la ecuación (5-12) y se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{8,9 + 0.008 * 0} - \frac{0.035}{1 + 0^3}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = 0,078$$

De esta forma ahora se puede calcular el límite de Betz o  $C_p$  mediante la ecuación (5-11), tal como se muestra a continuación:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 * \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4 * 0 - 5 \right) * e^{\frac{-21}{\lambda_i}}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 * (116 * 0,078 - 0,4 * 0 - 5) * e^{-21*0,078}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,39$$

Para finalizar se procede a obtener el valor de potencia que puede entregar la turbina eólica mediante la ecuación (5-10), con una velocidad de  $4,51 \text{ m/s}$  dicho valor referido al estudio meteorológico previamente realizado.

$$P_m = \frac{1}{2} * 0,39 * 1,225 * 12,57 * 4,51^3$$

$$P_m = 277,23 \text{ W}$$

De esta forma se puede comprobar la validez de los resultados mediante ecuaciones y la simulación realizada en Simulink.

### 6.3 Resultados de la simulación

En base a los datos de radiación solar y velocidad del viento presentados en la sección 4.1 se realizó la simulación del sistema híbrido, se colocó como entrada de los paneles fotovoltaicos una irradiación promedio mensual de  $432 \text{ W/m}^2$  a partir de las estimaciones llevadas a cabo en la sección 4.1, considerando una temperatura constante de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ya que se asume control de temperatura integrado. Asimismo, se colocó como entrada al aerogenerador un valor de velocidad del viento de  $4,51 \text{ m/s}$  basados en las estimaciones de la sección 4.1, además, se considera un ángulo beta de  $0^\circ$ . Este valor corresponde a la mayor eficiencia que puede entregar el aerogenerador ya establece un límite de Betz de  $C_p = 0,41$ , con lo que se encuentra dentro de su rango máximo de funcionamiento y de esta forma se garantiza la mejor eficiencia del aerogenerador, para lo cual se presenta en la Figura 6-9.

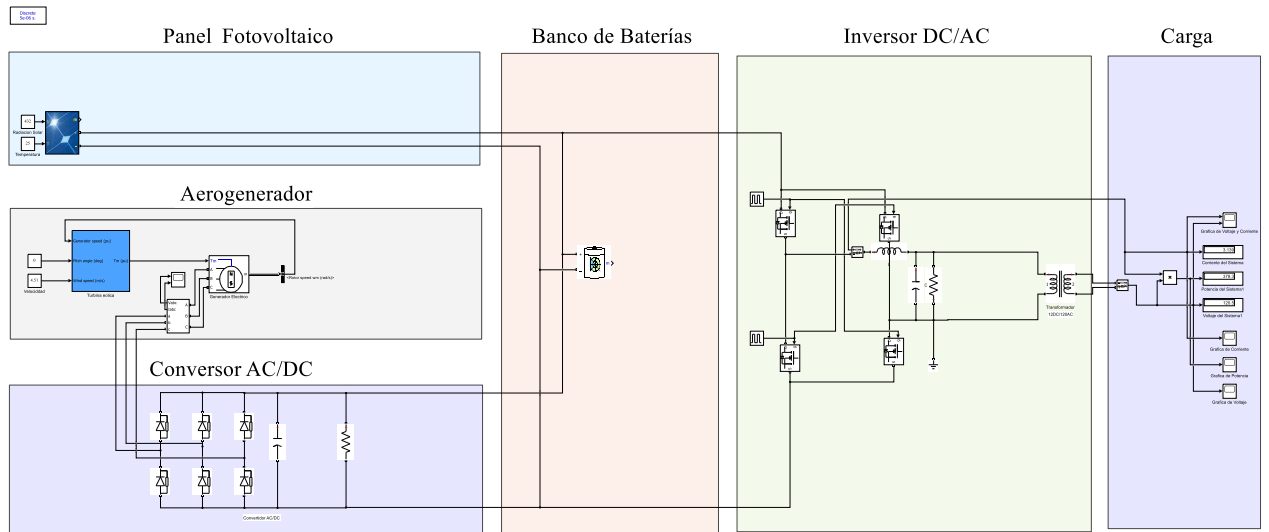


Figura 6-9: Simulación del sistema híbrido realizado en Simulink

Para observar las señales que proporciona el sistema se coloca un osciloscopio para determinar el voltaje, corriente, potencia. Se identifica en la Figura 6-10, la gráfica de voltaje la cual es una onda sinusoidal pura de 120 VAC lo cual estos parámetros son adecuados para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos que puede abastecer el sistema, además se aprecia que existe un pico más elevado en la primera oscilación de la señal, eso se debe a los capacitores que tiene el inversor ya que acumula voltaje y al entrar en funcionamiento el sistema existe un pequeño impulso lo cual es normal en el funcionamiento de este tipo de sistemas.

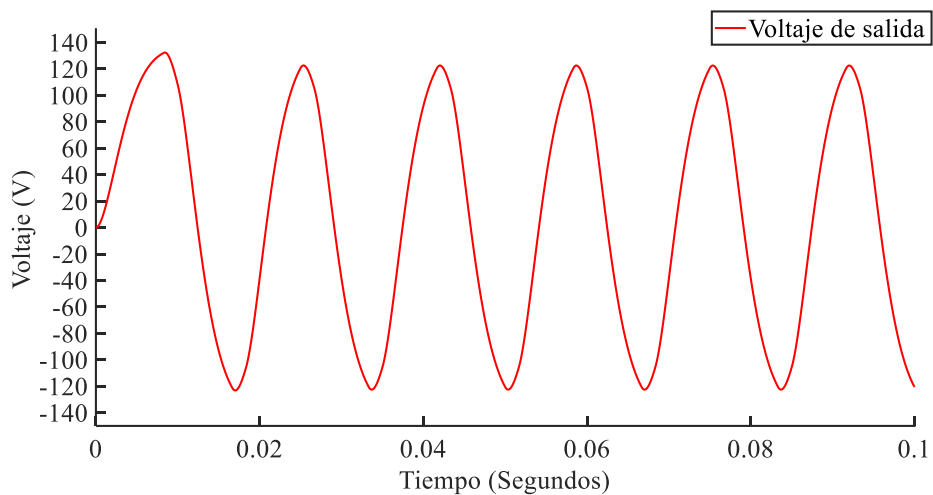


Figura 6-10: Voltaje de salida del sistema híbrido

Por otra parte, se muestra la gráfica de corriente del sistema representada mediante la Figura 6-11, la cual se observa que es una señal sinusoidal adecuada para el funcionamiento de la carga con un valor de 3,14 A.

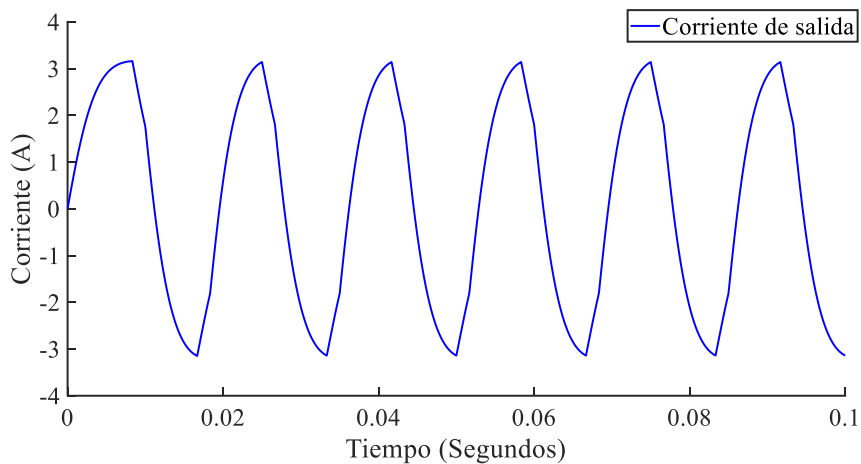


Figura 6-11: Corriente de salida del sistema híbrido

En función a los parámetros ya presentados se muestra la Figura 6-12, la cual contiene la potencia de salida del sistema la cual tiene un valor de  $378,7\text{ W}$ , lo cual es suficiente para el abastecimiento adecuado de la carga.

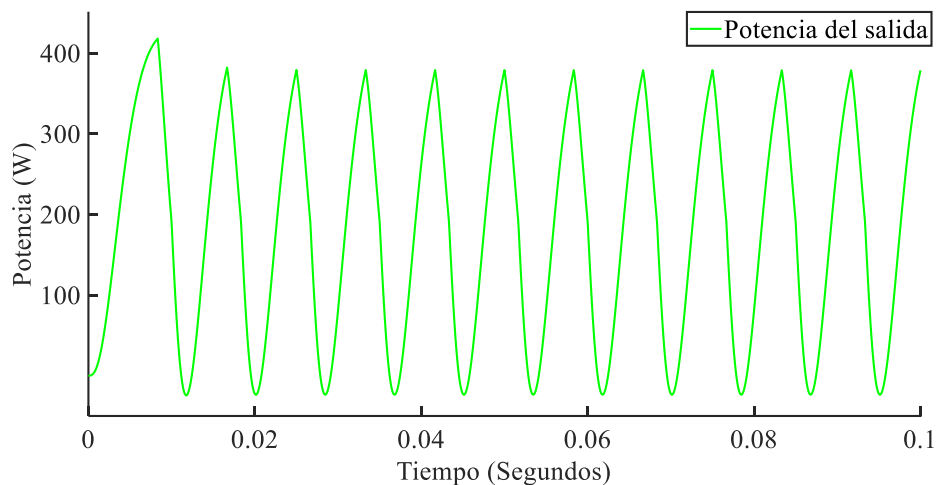


Figura 6-12: Potencia de salida del sistema híbrido

Para comprobar los resultados y el abastecimiento de la carga se realizaron algunas pruebas de funcionamiento del sistema así se plantea la Tabla 22, la cual muestra la carga de la batería de acuerdo con los datos de velocidad del viento y la radiación solar. Se puede apreciar que la batería se carga al 20 % con  $86,4\text{ W/m}^2$  de radiación solar y  $0,9\text{ m/s}$  de velocidad del viento, al llegar al 50 % con  $216\text{ W/m}^2$  de radiación solar y  $2,25\text{ m/s}$  de velocidad del viento, por consiguiente, se observa que la batería se carga al 100 % con  $432\text{ W/m}^2$  de radiación solar y  $4,51\text{ m/s}$  de velocidad de viento, de esta forma se logró comprobar que mientras mayor recurso solar y eólico exista la batería se cargará más rápido.

Tabla 22: Recurso renovable en función de la carga de batería

<b>Carga de la batería (%)</b>	<b>Irradiación W/m<sup>2</sup></b>	<b>Velocidad del viento (m/s)</b>
20	86,4	0,9
50	216	2,25
70	302,4	3,15
100	432	4,51

Por otra parte, también se evidencia el efecto de la descarga de la batería en los parámetros de salida siendo estos el voltaje, corriente, potencia, tal como se aprecia en la Tabla 23. Se pudo determinar que al 100 % de carga de la batería, la demanda es abastecida correctamente con 120 V para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos y la potencia requerida de 200 W es cubierta con los 378,7 W, de esta forma también se logra comprobar el funcionamiento adecuado de la batería en sentido de descarga.

Tabla 23: Parámetros de generación del sistema híbrido

<b>Carga de la batería (%)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (W)</b>
100	120,6	3,14	378,7
70	111,6	2,90	324,2
50	111,1	2,89	321,6
20	109	2,84	309,6

## 7 CONCLUSIONES

- A partir del análisis del potencial energético que puede establecer el sistema híbrido en el barrio San Juan, se logra definir que el proyecto es factible de llevar a cabo en el lugar establecido, ya que, al realizar mediciones reales para un mes del recurso, se han obtenido valores máximos de  $620 \text{ W/m}^2$  de radiación solar y  $6,49 \text{ m/s}$  de velocidad del viento. Además, luego de extrapolar los datos para todo el año 2024 mediante el Método de Montecarlo, se logra identificar que el promedio mensual del recurso en el lugar corresponde a  $432 \text{ W/m}^2$  de radiación solar y  $4,51 \text{ m/s}$  de velocidad de viento, valores suficientes para continuar con el diseño y simulación del proyecto.
- El diseño del sistema híbrido se llevó a cabo a partir del levantamiento de cargas, donde se ha establecido una demanda máxima de  $400 \text{ W}$  con un factor de utilización de 0,5 lo que representa una potencia de  $200 \text{ W}$ . A partir de esta carga se logró determinar las características técnicas que debe tener cada elemento del sistema, tanto en la etapa de generación de energía solar y eólica, así como en la conversión e inversión de energía, y finalmente en el almacenamiento de energía híbrida a través de baterías para el abastecimiento de la demanda hacia diferentes dispositivos electrónicos.
- La simulación del sistema eólico-fotovoltaico a través de Simulink ha permitido evidenciar que el conjunto de los elementos propuestos forma un adecuado sistema híbrido. Destacando que las condiciones de salida del inversor cumplen con la necesidad de abastecer una carga propuesta de  $200 \text{ W}$ , ya que al ingresar una radiación solar de  $432 \text{ W/m}^2$  y una velocidad del viento de  $4,51 \text{ m/s}$ , se logra obtener un voltaje de salida de  $120,5 \text{ VAC}$ , a una corriente de  $3,13 \text{ A}$  y una potencia de  $378,3 \text{ W}$ . Lo que permite concluir que todos los elementos que forman el sistema híbrido cumplen satisfactoriamente con una propuesta tecnológica eficiente y útil para el abastecimiento de cargas futuras en zonas rurales, que incluso pueden coadyuvar a la crisis energética actual que vive el país.
- Se realizó la simulación de los paneles fotovoltaicos considerando primero mantener constante la temperatura a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y variar la radiación solar, de esta forma se evidencio que mientras más radiación solar exista la potencia generada por el panel es mayor, es decir la relación entre la potencia generada y la radiación es directamente proporcional, por otra parte se consideró que la radiación solar se mantenga constante y la temperatura varia considerando  $5, 15, 25, 35, 50 \text{ }^\circ\text{C}$  para lo cual se evidenció claramente una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la potencia generada por el

panel, mientras la temperatura desciende la potencia generada por el panel es mayor y viceversa, esto se debe a que los paneles solares tienen un coeficiente de temperatura negativo para la potencia de salida, lo que significa que, al aumentar la temperatura, la eficiencia del panel disminuye, por otra parte, la temperatura afecta principalmente al material semiconductor del cual constituye al panel lo que hace que los electrones se exciten y reduzcan el voltaje del panel, es por esto que en climas más fríos, aunque la irradiación solar sea menor, los paneles pueden tener un mejor rendimiento en comparación con condiciones de alta temperatura.

## **8 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda que el presente documento sirva de guía para que se pueda llevar a cabo la implementación práctica del sistema híbrido, y permita conocer los elementos que se pueden emplear ya que está diseñado y simulado con elementos disponibles en el mercado ecuatoriano, además con el esquema realizado en Autocad se puede identificar la forma que podría tener el poste híbrido, además de las conexiones eléctricas que debe llevar la caja de control para lo cual es importante leer a detalle el documento para identificar el potencial del sistema híbrido diseñado.
- Se recomienda que el estudio de viabilidad se extienda a otras regiones del país, con condiciones climáticas y recursos similares. Esto brindará nuevas oportunidades para introducir sistemas híbridos eólico-solar y ampliar el uso de energía renovable en áreas remotas del país.
- Los posibles trabajos futuros se podrían establecer en función a la mejora del prototipo, tanto en su diseño como en su dimensionamiento, así como a maximizar el abastecimiento de la carga, mejorar la tecnología de los elementos, y llevar a cabo una implementación que incluya distintas pruebas de funcionamiento, que permitan evidenciar los resultados del proyecto en territorio en un futuro cercano.

## 9 REFERENCIAS

- [1] Mirada Territorial, “Diálogo cantonal sobre educación,” *Contrato Social Por La Educación ECUADOR*, 2010.
- [2] M. Him Díaz, “Design of an Hybrid Electric Generation System From Renewable Energy Sources-Case of Boca de Lurá,” 2013.
- [3] G. Saha, M. Bhadra, and T. Sen, “Simulation and Modeling of PV and Wind Hybrid Power System.” [Online]. Available: [www.ijfmr.com](http://www.ijfmr.com)
- [4] Galdiano Hernández Marta, “Aprovechamiento de energías renovables,” *Editorial ICB*, vol. 2, 2016.
- [5] EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A, “Informe Rendición Cuentas 2023 ELEPCOSA,” 2023.
- [6] A. G. Vera-Dávila, J. C. Delgado-Ariza, and S. B. Sepúlveda-Mora, “Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab,” *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 8, no. 2, pp. 343–356, Jun. 2018, doi: 10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972.
- [7] D. L. J. Jiménez, J. Toapanta, P. Muñoz, and R. S. Achig, “State-of-Health Assessment of Lithium-Ion Batteries in Two Scenarios: Microgrids and Electric Vehicles,” in *ECTM 2023 - 2023 IEEE 7th Ecuador Technical Chapters Meeting*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ETCM58927.2023.10309053.
- [8] Gabriel Sebastián Inca Yajamín, Daniel Fernando Cabrera Carrión, Dalton Fabián Villalta Gualán, Rodrigo Cristobal Bautista Zurita, and Hernan David Cabrera Carrion, “Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas,” 20 junio 2023.
- [9] Antonio del Rio and Nicté Luna, “Energías Renovables hacia la Sustentabilidad,” *Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, vol. 0.
- [10] A. B. Brizuela, “Energía no convencional -solar y eólica- para escuelas rurales en la provincia de Entre Ríos,” *Red Ciencia, Docencia y Tecnología*, 2005.
- [11] Nelson Arias Ávila, “Cartilla para la enseñanza de las energías renovables,” *Editorial Universidad de Burgos*, 2013.

- [12] Luis Daniel López Fernández and Braulio Cesar López Fernández, “DISEÑO ELÉCTRICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO ON GRID PARA EL COMPLEJO DE CONCIENTIZACIÓN Y CUIDADO DEL MAR, YUBARTA,” Guayaquil-Ecuador, 2022.
- [13] G. F. Velasco and E. Cabrera, “Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura.”
- [14] “Mapas de recursos solares de Ecuador.”
- [15] J. Romero, “Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró,” Barcelona, Jan. 2015.
- [16] J. Javier and P. Llerena, “DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO DISPONIBLE EN EL SECTOR MECHAHUASCA EN LA PARROQUIA DE PILAHUÍN, CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.,” Ambato-Ecuador, 2013.
- [17] -Hervas Moreira Jhonatan Alberto -Moscoso Noroña Miguel Fernando, “ANÁLISIS DEL POTENCIAL EÓLICO Y SOLAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN BASE AL USO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS EN EL PÁRAMO CHALUPAS, PERIODO 2015,” LATACUNGA-ECUADOR, 2015.
- [18] Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. 2018.
- [19] Cáceres Galán César Antonio, “Modelaje de un sistema hibrido eólico - solar para el análisis del comportamiento de electrificación en poblaciones del golfo de Guayaquil mediante Matlab & Simulink,” UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL, Guayaquil, 2024.
- [20] D. Borbor-Murillo, G. Fajardo Jácome, L. Sánchez-Holguín, and L. Cevallos-Torres, “Modelo de Simulación de Inventario basado en Algoritmo Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para minimizar costos por venta de productos perecederos,” *Ecuadorian Science Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 37–44, Mar. 2020, doi: 10.46480/esj.4.1.40.

- [21] FABARA RODRÍGUEZ CRISTIAN PAUL, “DISEÑO DE UN SISTEMA ENERGÉTICO AUTOSUSTENTABLE MODERNO PARA HOGARES MEDIANTE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (HEMS) Y LA APLICACIÓN DE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICO,” Quito, Sep. 2022.
- [22] “SILICON-CELL PYRANOMETER METERS | MP-100 & MP-200.” [Online]. Available: [www.apogeeinstruments.com](http://www.apogeeinstruments.com)
- [23] “Anemómetro Acurite professional weather center”.
- [24] “NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC-11 CAPÍTULO 14 ENERGÍAS RENOVABLES.”
- [25] A. Rocío, E. Rojas Hernández, and E. Díez Fernández, “Caracterización espectral de células solares comerciales,” 2011.
- [26] Mathworks.com, “Implement model of variable pitch wind turbine - Simulink - MathWorks América Latina.”
- [27] Wilaeba electronica, “Filtro Pasa bajos Activo de 1er Orden RC.” Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/01/filtro-pasa-bajos-pasivo-de-2do-orden-rlc.html>