



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA EN
AEROGENERADORES SIN ASPAS PARA SECTORES
RURALES DEL CANTÓN EL TAMBO.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

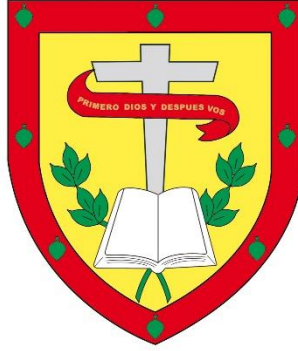
AUTOR: JORGE LUIS CAZHO MAINATO

DIRECTOR: ING. DANIEL ORLANDO ICAZA ÁLVAREZ

CUENCA - ECUADOR

AÑO 2023 - 2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA EN
AEROGENERADORES SIN ASPAS PARA SECTORES
RURALES DEL CANTÓN EL TAMBO.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: JORGE LUIS CAZHO MAINATO

DIRECTOR: ING. DANIEL ORLANDO ICAZA ÁLVAREZ

CIUDAD - ECUADOR

AÑO 2023 - 2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Jorge Luis Cazho Mainato portador de la cédula de ciudadanía N° 030262711-2. Declaro ser el autor de la obra: "Análisis De Prefactibilidad Técnica En Aerogeneradores Sin Aspas Para Sectores Rurales Del Cantón El Tambo.", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 23 de abril de 2024

F:.....

Jorge Luis Cazho Mainato

030262711-2

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Luis Cazho Mainato, bajo mi supervisión.



Ing. Daniel Icaza Alvarez MsC.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico primero a Dios por haberme concedido vida, salud y fortaleza para cumplir mis metas y mis sueños.

A mi madre Esperanza por su apoyo incondicional durante su vida y la carrera universitaria siendo la motivación principal de superación para seguir adelante siendo un ejemplo de constancia y lucha ante las adversidades.

A mis hermanos William, Byron y Belén por sus palabras de aliento que siempre estuvieron con todo su apoyo constante.

A mi hijo Adrián que ha sido la inspiración para lograr culminar mis estudios universitarios.

Finalmente, a mis docentes y compañeros que hemos compartido buenos y malos momentos, pero a pesar de ellos siempre estuvieron allí con su constancia y dispuestos a buscar soluciones a los problemas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi familia por su apoyo incondicional en todo momento, por haberme permitido llegar a realizar esta investigación en esta magnífica carrera con éxito.

Mi agradecimiento y gratitud al ingeniero Daniel Icaza, exdirector de carrera y un amigo siempre presto y dispuesto con su capacidad y profesionalismo como tutor de este proyecto de investigación realizado.

Un agradecimiento especial a los ingenieros Carlos Méndez, Juan Carlos Cobos, Carlos Flores y Diego Morales, por su entrega como docentes y sus enseñanzas durante la carrera han hecho que me forme en el campo del conocimiento como un profesional.

Agradezco a la Universidad Católica De Cuenca y a sus colaboradores que contribuyen a formar profesionales.

Jorge Cazho

RESUMEN

El presente trabajo realiza un análisis de prefactibilidad técnica para la implementación de un sistema de aerogeneradores sin aspas en la comunidad rural de Marcopamba, ubicada en el Cantón El Tambo, Ecuador. Se analiza el potencial eólico de la zona mediante la obtención y procesamiento de datos históricos de velocidad del viento. Con ello se determina la viabilidad técnica del proyecto, estimando la potencia máxima instalable y energía anual generable. Se dimensiona un prototipo de aerogenerador sin aspas para suplir la demanda eléctrica de 35 familias. Finalmente, se realiza una simulación del sistema mediante software, evaluando su comportamiento.

Se aplican distribuciones estadísticas como Weibull para analizar los datos de velocidad del viento. También se dimensiona el sistema de almacenamiento en baterías para almacenar la energía generada. Se realiza un análisis costo-beneficio a 20 años, concluyendo que el proyecto es técnicamente factible. El aprovechamiento de las fuentes renovables permite el desarrollo rural sustentable, mediante energías limpias y de bajo costo.

Los resultados del estudio demostraron que la producción de energía del aerogenerador sin aspas para una vivienda individual fue de 4.13 kWh al día. En el caso de las 35 viviendas, se obtuvo una generación diaria de 144.16 kWh. En ambos casos, la generación eólica fue suficiente para abastecer el consumo diario de energía de una vivienda (3.5 kWh) y de las 35 viviendas (121.42 kWh).

Palabras clave: aerogeneradores, potencial eólico, prefactibilidad técnica, simulación eólica

ABSTRACT

This research carries out a technical prefeasibility analysis for the implementation of a bladeless wind turbine system in the rural community of Marcopamba, located in the canton of El Tambo in Ecuador. The wind potential of the area is analyzed by obtaining and processing historical wind speed data. This determines the technical viability of the project, estimating the maximum installable power and annual energy generation. A prototype of a bladeless wind turbine is sized to meet the electrical demand of 35 families. Finally, a system simulation is carried out using software, evaluating its behavior.

Statistical distributions such as Weibull are applied to analyze the wind speed data. The battery storage system is also sized to store the generated energy. A 20-year cost-benefit analysis, concluding that the project is technically feasible. The use of renewable sources allows sustainable rural development through clean and low-cost energy.

The results of the study showed that the bladeless wind turbine produced 4.13 kWh per day for an individual house and 144.16 kWh for 35 houses. In both cases, the wind generation was sufficient to supply the daily energy consumption of one house (3.5 kWh) and 35 houses (121.42 kWh).

Keywords: wind turbines, wind potential, technical prefeasibility, wind simulation

Contenido

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS.....	12
LISTA DE ANEXOS	13
CAPÍTULO I.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.2. Aprovechamiento de la energía eólica.....	19
1.3. Aerogeneradores eólicos.....	25
1.4. Estimación de potencia eólica disponible.....	31
1.5. Problema.....	33
1.6. Objetivos.....	34
Objetivo general.....	34
Objetivos específicos.....	34
1.7. Alcance.....	34
1.8. Justificación.....	35
1.9. Metodología.....	35
CAPÍTULO II.....	38
2.1. Tipo y nivel de investigación	38
Longitudinal:.....	38
Retrospectiva:.....	38
Cuantitativa:.....	38
Nivel de investigación.....	39
2.2. Método y diseño de la investigación	39
Método general.....	39
Método específico	39
Diseño de la investigación.....	40
2.3. Técnicas e instrumentos de recopilación de datos.....	41
2.4. Técnicas de procesamiento de datos.....	41
2.5. Selección del lugar de estudio	41
2.6. Ubicación del proyecto.....	42
2.7. Obtención de datos.....	43
2.8. Análisis de datos eólicos.....	45
2.9. Aplicación de la probabilidad de Weibull	48

2.10.	Estimación de la potencia eólica disponible	52
CAPÍTULO III.		55
3.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO.....	55
3.1.	Potencia disponible en el viento.....	55
3.2.	Cálculo del área de barrido de vortex	56
3.3.	Cálculo de velocidad media a diferentes alturas	57
3.4.	Computo del coeficiente de potencia	59
3.5.	Curvas de potencia para los aerogeneradores tipo Vortex.....	60
3.6.	Análisis de la turbulencia en campo con aerogeneradores tipo Vortex 61	
3.7.	Caracterización de la carga rural	62
3.8.	Selección del aerogenerador Vortex.....	62
3.9.	Cálculo de energía total suministrada a la carga.....	63
3.10.	Cálculo del inversor	65
3.11.	Cálculo del banco de baterías.....	66
3.12.	Cálculo de regulador de carga	67
3.13.	Instalación del Vortex.....	68
3.14.	Funcionamiento del sistema eólico diseñado.....	68
CAPÍTULO IV.		70
4.	Simulación del sistema eólico mediante software Matlab Simulink.	70
4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
4.2.	Análisis de formas de ondas del sistema eólico sin aspas para 35 viviendas 79	
CONCLUSIONES.....		89
RECOMENDACIONES		90
BIBLIOGRAFÍA		91
Anexos.....		97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imanes permanentes 1. Axial y 2. Radial	24
Figura 2. Generador eólico horizontal	27
Figura 3. Aerogenerador de tipo vertical.....	27
Figura 4. Aerogenerador sin aspas Tacoma Vortex bladeless	28
Figura 5. Ubicación del sitio Cantón El Tambo de la comunidad Marcopamba.....	42
Figura 6. Ubicación del lugar provincia Cañar Cantón El Tambo elaborado QGIS 3.34.1.	43
Figura 7. Atlas eólico mundial	44

Figura 8. Velocidad media del viento a diferentes alturas, El Tambo - Ecuador.....	45
Figura 9 . Frecuencia de velocidades, El Tambo - Ecuador.	47
Figura 10. Probabilidad de Weibull para velocidades del viento de El Tambo - Ecuador.	50
Figura 11. Frecuencias acumuladas para velocidades del viento de El Tambo - Ecuador.	52
Figura 12. Potencia disponible para Vortex de 2.75 m	58
Figura 13. Potencia disponible para Vortex de 10 m.	59
Figura 14 . Curva de potencia para Vortex de 2.75 m	60
Figura 15 . Curva de potencia para Vortex de 10 m	61
Figura 16 Diagrama completo del sistema de generación eólico sin aspas	69
Figura 17. Red de estudio propuesta.....	71
Figura 18. Generación eólica sin aspas	72
Figura 19. Sistema de reserva de energía	73
Figura 20. Controlador de sistema de almacenamiento	74
Figura 21. Modelación de carga rural	74
Figura 22. Perfil del viento para sistema eólico	75
Figura 23. Potencia generada por generador eólico sin aspas	76
Figura 24 Falla generada en sistema de generación eólica sin aspas	77
Figura 25. Comportamiento de carga eléctrica rural en simulación	77
Figura 26. Comportamiento del sistema de almacenamiento	78
Figura 27. Perfil del viento para sistema eólico	80
Figura 28. Potencia generada por generador eólico sin aspas – 35 viviendas	81
Figura 29. Falla generada en sistema de generación eólica sin aspas – 35 viviendas	82
Figura 30. Comportamiento de carga eléctrica rural en simulación – 35 viviendas.....	82
Figura 31. Comportamiento del sistema de almacenamiento – 35 viviendas	83
Figura 32. Diagrama de simulación para una vivienda	97
Figura 33. Script para carga de datos de demanda rural.	97
Figura 34. Script para carga de datos de velocidad del viento.	98
Figura 35. Diagrama de simulación para 35 viviendas.	98
Figura 36. Script para carga de datos de demanda rural – 35 viviendas.	99
Figura 37. Script para carga de datos de velocidad del viento – 35 viviendas	99
Figura 38. Diseño en 3D Autocad.	100
Figura 39. Consumo de carga rural	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.....	46
Tabla 2.....	47
Tabla 3.....	48
Tabla 4.....	50
Tabla 5.....	51
Tabla 6.....	55
Tabla 7.....	56
Tabla 8.....	59
Tabla 9.....	62
Tabla 10.....	65
Tabla 11.....	66
Tabla 12.....	67
Tabla 13.....	68
Tabla 14.....	79
Tabla 15.....	84
Tabla 16.....	85
Tabla 17.....	85
Tabla 18.....	86
Tabla 19.....	87
Tabla 20.....	88

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS 1: Simulación para una vivienda.	97
ANEXOS 2;Script para la generación de datos de carga - una vivienda	97
ANEXOS 3:Script para la generación de datos de velocidad del viento - una vivienda.....	98
ANEXOS 4:Simulación para 35 viviendas	98
ANEXOS 5:Script para la generación de datos de carga - 35 viviendas.....	99
ANEXOS 6:Script para la generación de datos de velocidad del viento - 35 viviendas	99
ANEXOS 7:Diseño del Aerogenerador sin Aspas y sus Partes	100
ANEXOS 8: Curva característica del consumo rural	100

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica, derivada del movimiento de la masa de aire conocida como viento, ha sido aprovechada a lo largo de la historia para impulsar avances significativos en el desarrollo global. Inicialmente, los egipcios utilizaron esta forma de energía cinética para la navegación y para operar grandes molinos que facilitaban el riego (Bautista et al., 2023).

Posteriormente, en Europa, específicamente en el siglo XII, surgieron los primeros molinos de viento, tanto en Francia como en Inglaterra. En Francia, se destacó el desarrollo de un molino de viento con ocho aspas, que medía nueve metros de longitud y se empleaba para diversas tareas, como la molienda y el bombeo de agua (Landerá et al., 2020).

En la era actual, la energía eólica se emplea mayormente para la generación de electricidad a través de una variedad de aerogeneradores, adaptados según la disponibilidad del recurso eólico en cada región. Estos aerogeneradores se encuentran conectados a redes de distribución eléctrica o bien son utilizados en ámbitos industriales o residenciales (Santos & Araújo, 2023).

Esta forma de energía representa un cambio significativo en la matriz energética, debido a su abundancia en la naturaleza y su competitividad en términos de costos, lo que facilita su implementación incluso en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica convencional (Dasí et al., 2023).

Sin embargo, el crecimiento notable en la planificación y construcción de nuevos parques eólicos conlleva costos tanto en su establecimiento como en su mantenimiento, y puede tener un impacto visual que resulta atractivo para algunos observadores (López et al., 2021).

El impacto del consumo energético de la generación actual plantea interrogantes en las futuras generaciones que necesitan ser abordados de forma efectiva. En 2018, el consumo mundial de energía alcanzó un récord de 13.864,9 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) (Hosseini & Moraga, 2020). El incremento del consumo total de energía de ese año en un 2,9%, el doble del crecimiento promedio de la década anterior resalta la urgencia e importancia de estas problemáticas. Ante este

desafío monumental, los gobiernos nacionales deben trabajar en estrecha colaboración para desarrollar políticas oportunas y coherentes (International Energy Agency, 2021).

La energía renovable juega un papel crucial en la mitigación y adaptación al cambio climático en todo el mundo. La generación de electricidad a partir de fuentes sostenibles experimentó un crecimiento del 7% en 2020, representando una gran proporción del aumento del 3% en el uso de energías renovables (Marquez, 2019). Se espera que, en 2024, la generación de electricidad renovable aumente más del 8%, con una contribución importante de la energía solar fotovoltaica (PV) y la eólica (International Energy Agency, 2021).

Más allá de los beneficios evidentes de la energía renovable, como la ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los bajos costos operativos, tanto los paneles solares como las turbinas eólicas presentan sus propios contratiempos. El empleo de paneles solares suscita grandes interrogantes acerca del manejo de las células solares en desuso, mientras que las turbinas eólicas han sido consideradas inapropiadas para áreas urbanas (Gómez, 2020).

Aprovechar la energía eólica en entornos urbanos implica superar los desafíos vinculados con la vibración, el ruido y la disponibilidad de espacio para la instalación. Las turbinas eólicas sin aspas (BWT) representan una tecnología avanzada que transforma la energía del viento en electricidad en el contexto de las ciudades (Perpina et al., 2018).

La tecnología BWT puede ser fácilmente incorporada en áreas urbanas e incluso integrada en el diseño arquitectónico de edificios. Las ventajas de esta integración son la reducción del ruido, la eliminación de sombras intermitentes y la protección de las aves migratorias (Abimbola et al., 2023). Reconocida como una transformadora de energía eólica, sus costos de mantenimiento suelen ser inferiores a los de las turbinas eólicas tradicionales (Cosmas, 2023).

Además, la BWT puede ser combinada con paneles solares para formar sistemas híbridos, potencialmente aumentando la producción de energía eléctrica y mejorando la eficiencia general del sistema. Por tanto, la BWT se postula como una solución sostenible para la generación de energía eólica en entornos urbanos (Gerarden, 2023).

Dado que ocupa únicamente espacio vertical, los expertos consideran que la forma cilíndrica de la BWT es adecuada para su implementación en zonas residenciales.

Su diseño avanzado contribuiría a la modernización de la arquitectura urbana (Esen et al., 2019).

Los aerogeneradores sin aspas destacan por su carácter innovador y su eficiencia para generar energía incluso en condiciones de viento bajo y flujo turbulento, especialmente en entornos urbanos. Este atributo clave impulsa su implementación en áreas urbanizadas con un potencial significativo para la energía eólica. Entre estas áreas dentro de las ciudades se incluyen los techos de edificios altos, los espacios circundantes a estructuras de varios pisos, las calles urbanas, así como las infraestructuras ferroviarias y de transporte público (Tasneem et al., 2020).

A pesar de encontrarse en la fase de prototipo, la tecnología BWT o vortex sin aspas ha evidenciado su valía como una innovadora tecnología eólica, especialmente diseñada para la generación en sitio, ya sea en espacios abiertos o en áreas residenciales (Davang et al., 2018). Además, estas turbinas eólicas sin aspas tienen la capacidad de operar tanto conectadas a la red como de forma independiente, pudiendo complementarse con paneles solares u otros generadores.

Se han desarrollado dos variantes comerciales de turbinas sin aspas, una con capacidad de 100 W y otra de 4 kW. Las turbinas de menor tamaño, con una altura de 3 metros y un peso de 10 kilogramos, son capaces de suministrar suficiente energía para iluminación y algunos servicios básicos, estimándose una inversión inicial de alrededor de 250 dólares. Por otro lado, las turbinas de mayor tamaño, con una altura de 13 metros y un peso de aproximadamente 100 kilogramos, pueden proporcionar electricidad continua para un hogar en áreas con vientos adecuados, estimándose un costo aproximado de \$5000 (Vortex Bladeless, 2023).

Además de los modelos comerciales, se está desarrollando un gigantesco modelo de turbina de vórtice, con una altura de 150 metros y un peso de 100 toneladas, con capacidad para generar 1 MW. Aunque los costos específicos para este modelo aún no se han determinado, se espera que su precio sea proporcionalmente menor en comparación con los modelos más pequeños (Mishnaevsky et al., 2023).

A pesar que el costo medio de generación de energía por vatio para las turbinas eólicas sin aspas puede ser mayor que el de los paneles solares, estas siguen siendo económicamente viables en regiones con vientos consistentes, donde pueden operar de manera más eficiente que los paneles solares (Gómez, 2020).

Si bien el consumo energético actual se basa en gran medida en combustibles fósiles, la tendencia hacia fuentes renovables, como la energía eólica y solar, cobra

cada vez más fuerza. En este contexto, la generación eólica se ha convertido en un actor fundamental en la lucha contra las emisiones de carbono, especialmente en el sector eléctrico.

En 2022, la energía eólica alcanzó un hito significativo al producir el 7,6% (2160 TWh) de la electricidad mundial, consolidándose como una alternativa viable a los combustibles fósiles. A la cabeza de este cambio se encuentra China, que con una producción del 9,3% (824 TWh) se posiciona como líder en energía eólica. Le sigue Dinamarca, con un notable 5,5% (19 TWh) de su energía proveniente de esta fuente renovable (Rehman et al., 2022).

La capacidad energética instalada en América Latina y el Caribe, en el 2021, fue la hidráulica, mientras que solo el 8,0% era eólica. En muchos países alcanzaron el promedio a nivel mundial o lo superaron: Uruguay (36 %), Chile (28 %), Brasil (15 %), Argentina (12 %). Sin embargo, algunos países, como Cuba (1,4 %), Colombia (0,7 %), En el Ecuador la energía eólica tiene una generación del 0.3% lo que hasta el momento han desarrollado muy poco estos países tienen un alto porcentaje de electricidad que proviene de recursos de energía hidroeléctrica (Banco Interamericano de Desarrollo, 2021).

El objetivo principal de este trabajo de titulación es llevar a cabo un estudio sobre aerogeneradores sin aspas, con el fin de realizar un diseño preliminar y simular su funcionamiento bajo las condiciones eólicas de la comunidad de Marcopamba, Cantón El Tambo, Provincia de Cañar, Ecuador. Con una población de 9,475 habitantes, según datos de (Canguana, 2019), este estudio busca proporcionar suministro energético en un futuro a aproximadamente 35 familias de manera directa.

1.1. MARCO TEÓRICO.

La energía eólica tiene un origen remoto, remontándose al año 4500 a.C., cuando los antiguos egipcios aprovechaban este recurso para la navegación (Bahadur, 2022). Los molinos de viento, inicialmente de pequeña escala, evolucionaron hasta lograr importantes desarrollos en la generación eléctrica. Sin embargo, las características del viento son generalmente aleatorias e impredecibles, por lo que se aplican métodos estadísticos para realizar predicciones sobre la intensidad del viento y estimar la posible producción de energía.

- **Energías renovables:** Esta energía se encuentra en la naturaleza y es de tipo inagotable, se considera una energía limpia que ayuda a suplir a

las demás energías tradicionales como la hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz, biomasa, solar y eólica.

- **Viento:** Se denomina como el desplazamiento de masas de aire en la atmósfera producidas por factores como: la diferencia de presión atmosférica y por la fuerza de Coriolis.
- **Rotor:** Este elemento es donde van acopladas las aspas por lo habitual van conectados a un rotor.
- **Estator:** Se trata de la parte fija del aerogenerador formado por dos discos de acero donde se sujetan los imanes permanentes. Estos imanes pueden ser de diferentes materiales, como ferrita, neodimio o samario-cobalto, dependiendo del diseño y las especificaciones del aerogenerador. Es importante destacar que la elección del tipo de imán permanente utilizado en el estator dependerá de factores como el costo, la eficiencia requerida, la temperatura de operación y la disponibilidad de materiales. Mientras que los imanes de neodimio son conocidos por su alta densidad de energía y fuerte campo magnético, otros tipos de imanes también pueden ser utilizados en aerogeneradores, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto.
- **Góndola:** Conocido como el habitáculo es donde van acoplados los elementos que forman parte del generador eléctrico.
- **Anemómetro:** Dispositivo que mide la velocidad del viento este permite detectar y poner en funcionamiento el aerogenerador.
- **Eje de alta velocidad:** Gira a una velocidad de 1500 revoluciones por minuto
- **Generador:** Transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- **Controlador:** Analiza las condiciones del viento, este aumenta o disminuye la eficiencia del aerogenerador.
- **Multiplicador:** En algunos diseños de aerogeneradores, se utiliza un multiplicador o caja de engranajes para transformar la velocidad de rotación de baja a alta. Sin embargo, en el caso de los aerogeneradores sin aspas, no se requieren engranajes ni ejes, ya que el diseño circular permite aprovechar la energía eólica sin necesidad de estos componentes mecánicos.
- **Fuerza estructural:** Es un estudio de ingeniería conocido como una fuerza de deformación aplicada sobre una base o estructura que al paso del tiempo sufrirá de deformaciones.

- **Resonancia eléctrica:** Este fenómeno es provocado por un circuito eléctrico a una cierta frecuencia de resonancia.
- **Campo magnético:** es un campo de fuerza creado por el movimiento de cargas eléctricas.
- **Fluidos:** son materiales formados por sustancias y compuestos químicos que hacen que produzcan una fuerza interna que tienden a resistir su configuración original o son conocidos como sólidos deformables.
- **Reynolds:** Es un número adimensional usado en mecánica de fluidos o la conformación de materiales que cumplan ciertas características especiales de modelo sea laminar o turbulento.

1.2. Aprovechamiento de la energía eólica.

Esta fuente de energía renovable hace referencia a la tecnología y a las aplicaciones que aprovechan la energía cinética del viento, para convertirla en energía eléctrica. Los parques eólicos se encuentran formados por gran cantidad de aerogeneradores, en la actualidad la tecnología permite desarrollar nuevos modelos con equipos encaminados a la generación a gran escala con mecanismos de menor tamaño, mantenimiento más sencillo y de mayor duración a menor costo en inversión. Para la construcción de estos parques, se deben realizar análisis estadísticos para caracterizar el viento y cuantificar la disponibilidad del recurso eólico, el mismo que permitirá determinar la viabilidad del proyecto de manera que si se implementa se logra mitigar el impacto ambiental (Škvorc & Kozmar, 2021).

1.2.1. Potencial del viento.

La importancia de comprender la disponibilidad del recurso eólico existente en el lugar de estudio, este recurso renovable tiende a cambios debido a las condiciones que presenta el lugar o también llamado régimen de viento:

- Posición geográfica.
- Altura geográfica.
- Orografía del lugar.
- Periodo u hora del día.

Estas condiciones están directamente relacionadas con la radiación solar, debido a que el viento es originado por la diferencia de densidad del aire. La región andina o sierra incluye áreas ubicadas sobre los 1.300 m.s.n.m hasta la cúspide de las montañas (Wang et al., 2022).

1.2.2. Energía del viento.

Es el movimiento del aire causado por la diferencia de temperatura que se encuentra en la tropósfera, la masa de energía solar es calentada de manera desigual haciendo que el aire caliente suba y el aire frío desciende en formas de movimiento circundante que puede tener velocidades altas o bajas; dependiendo además de la altura (Bispo et al., 2019).

La energía del viento, durante un periodo de tiempo en funcionamiento del aerogenerador es conocido como potencia de aerogenerador eólico debido a la variación de la velocidad y estabilidad, esto permite dimensionar las características del aerogenerador, además permite conocer las condiciones del sitio ambiental donde será instalada para su uso y funcionamiento (Bispo et al., 2019).

El viento presenta una serie de corrientes de aire que se encuentran en constante movimiento esto puede ser laminar o turbulento, debido al calentamiento de la tierra generado por el calentamiento de los rayos del sol; se puede decir que la energía eólica se deriva de la energía solar, se estima que un 2% de la energía solar es convertida en viento (Bispo et al., 2019).

El movimiento del aire en masa es conocido como viento, la densidad puede ser baja cuando esta es movida con una velocidad v , esta tiene una energía cinética que se representa mediante la ecuación (1).

$$E = \frac{1}{2} m_{aire} v^2 \quad (1)$$

Además, la densidad del aire es ρ , entonces la energía cinética por volumen de aire con velocidad v esta dada por la ecuación (2).

$$E_v = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

Donde:

E es energía cinética $\left[\frac{kgm^2}{s^2} \right]$.

m es masa del viento $[kg]$.

v es la velocidad del viento $\left[\frac{m}{s} \right]$.

ρ es la densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

La potencia del flujo de aire a través de A , es el flujo de energía cinética en una unidad de tiempo (Bispo et al., 2019). Esto se puede expresar mediante la ecuación (3).

Energía por unidad de tiempo = Potencia

$$\frac{1}{2} \rho v^2 * v A = P \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

Donde:

P es Potencia $[kg]$.

ρ es la Densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

v es la Velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$.

A Área perpendicular $[m^2]$.

1.2.3. Resonancia aerodinámica

La resonancia surge a partir de un movimiento oscilatorio periódico provocado por la acción del viento o también conocida como resonancia aerodinámica, generando corrientes y voltajes. Aeroelasticidad, se inicia a partir de la interacción de fuerzas, el aire induce movimiento oscilatorio sobre un cuerpo con una frecuencia natural en relación con una frecuencia de aparición formando torbellinos llamados vórtices (Hu et al., 2020). Las vibraciones y movimientos inducidos (VIV) en el cuerpo que interactúa sobre un fluido produciendo movimiento periódicos regulares e irregulares. La aparición de torbellinos se da cuando existe una frecuencia periódica con la fuerza del viento en una dirección a la corriente incidente, como se presenta en la ecuación (4).

$$f = \frac{St * v}{\Phi} \quad (4)$$

St es la constante de proporcionalidad.

v es velocidad media incidente de la corriente

Φ es la inversa de la dimensión.

La dirección del viento varía constantemente, por lo que el aerogenerador sin aspas, al tener un diseño circular, no necesita estar orientado en una dirección específica para captar la energía del viento. Además, la velocidad del viento suele aumentar a medida que se aleja del suelo, lo que puede ser aprovechado por este tipo de aerogeneradores (Zahariea et al., 2019).

El rendimiento energético para la conversión entre energía cinética proveniente del viento a energía mecánica, según la ley de Betz se puede aprovechar el 59% en un aerogenerador sin aspas (Betoka-Onyama et al., 2022). La parte de la estructura rígida se llamará con el nombre de mástil, siendo este el que logra recolectar energía.

La altura característica del diseño de este prototipo será de característica cilíndrica, esta se acopla a una estructura estática lo que permite aprovechar y fijar con un mayor ajuste.

La forma cilíndrica del aerogenerador sin aspas se acopla a una estructura estática, lo que permite un mayor ajuste y aprovechamiento de la energía eólica. La característica de dimensión Φ es la suma del diámetro del mástil, como se representa en la ecuación (5).

$$\Phi = D + \alpha * \tag{5}$$

Otro de los aspectos importantes es la amplitud de oscilación dado como X el incremento del factor de ajuste α que depende de la relación de fuerzas inerciales y la fuerza de fricción viscosa conocida como Reynolds (Pamososuryo et al., 2022). Esto permite un ajuste de un desprendimiento ordenado de vórtices.

Para un ajuste de la varilla flexible de longitud L empotrada en la parte superior del mástil, en la parte inferior una fijación con flexionamiento al suelo, teniendo en cuenta que la parte del mástil está ajustada a la parte rígida que oscila ángulos pequeños. Para asumir tal efecto, se puede deducir que $y = \frac{L}{2}$ la amplitud de oscilación X sería nula la posición característica coincide con el diámetro del mástil $\Phi = \frac{D*L}{2}$ y su frecuencia sería $v_{\infty} = \frac{L}{2}$, se puede deducir a partir de la ecuación (6).

$$f = St * \frac{v_{\infty} \left(\frac{L}{2} \right)}{d} \quad (6)$$

En este caso, permite calcular la sección del mástil donde el valor de oscilación no sería despreciable y la frecuencia de desprendimiento del flujo turbulento resulta en la ecuación (7).

$$f(y) = \frac{St * v_{\infty}(y)}{d(y) + \alpha * X(y)} \quad (7)$$

$v_{\infty}(y)$ es la velocidad de fluido.

$X(y)$ es la amplitud de oscilación del mástil depende de la altura del mástil que disponga.

H es la distancia de empotramiento de la varilla flexible.

La varilla deberá ser fijada en la parte alta del mástil hasta la parte inferior del dispositivo con una fijación solidaria, para lo cual, se emplea la ecuación (8).

$$X(y) = d * \frac{v_{\infty}(y)}{H - \frac{L}{2}} * \gamma * \quad (8)$$

γ es las veces del diámetro del mástil.

1.2.4. Aerogeneradores sin aspas

El aerogenerador sin aspas es un mecanismo de forma cilíndrica que consta de un mástil vertical. Este dispositivo aprovecha la vibración provocada por el viento, convirtiendo las oscilaciones en energía eléctrica y utilizando así una fuente renovable disponible en el entorno. El movimiento oscilatorio generado por este medio de generación sin aspas acciona un alternador compuesto por imanes y bobinas, permitiendo la conversión a electricidad (Tripathi et al., 2023).

1. Mástil vertical: Estructura principal del aerogenerador que oscila por la acción del viento.

2. Alternador: Compuesto por imanes y bobinas, convierte la energía mecánica de las oscilaciones en energía eléctrica.

3. Principio de resonancia: El viento induce movimientos oscilatorios en el mástil a su frecuencia natural, amplificando la vibración.

4. Efecto de aeroelasticidad: La interacción entre el aire y la estructura del mástil genera torbellinos que contribuyen a la oscilación.

1.2.5. Resonancia en aerogeneradores sin aspas

Para lograr un funcionamiento óptimo, el aerogenerador sin aspas requiere una velocidad constante del viento. La frecuencia de desprendimiento de vórtices es proporcional a la velocidad de la masa de aire, mientras que la frecuencia de oscilación de la estructura del aerogenerador es natural y fija. Cuando la velocidad del viento alcanza un valor específico, se produce una resonancia amplificada conocida como "lock-in" (Karimzadeh et al., 2022). Este fenómeno permite incrementar el número de horas de operación del sistema.

El oscilador armónico amortiguado consta de dos imanes permanentes de magnetización b , esto se conoce como magnetización de un cuerpo haciendo girar en promedio. Enfrentados por los mismos polos, uno es solidario con la masa del otro es fijo, la fuerza de los imanes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia medida de sus polos (Gao et al., 2023).

La fuerza de repulsión debe ser lineal superior dependiendo del desplazamiento a medida que acercan los imanes crece la repulsión oscilatoria a frecuencia creciente con amplitud descrita por la ecuación (9).

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k + k'(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (9)$$

k es la elasticidad correspondiente a la repulsión magnética

En este análisis se busca un diseño de comportamiento independiente a la dirección del viento que tenga una simetría axial completa, para ello se puede implementar pares de imanes permanentes y/o circulares, donde el de menor radio es fijo magnéticamente confinados en su interior y de mayor radio tiene su polarización estos pueden ser según la necesidad sean radiales o axiales (ver Figura 1).



Figura 1. Imanes permanentes 1. Axial y 2. Radial

Fuente: (Jiang et al., 2022)

1.2.6. Alternador

La conversión de energía mecánica en energía eléctrica en los aerogeneradores sin aspas se logra mediante un acoplamiento electromecánico. Una de las opciones más claras es la inducción electromagnética, utilizando un alternador de imanes permanentes. El movimiento oscilatorio del mástil condiciona el diseño del alternador, adaptándose a la tecnología de los aerogeneradores sin aspas. La interacción entre los imanes y la bobina en la posición de flexión máxima, así como las fuerzas producidas por los imanes y núcleos de hierro, son admitidas por el sistema dinámico (Marpaung, 2022).

1.2.7. Fatiga en materiales de aerogeneradores sin aspas

Los materiales que componen los aerogeneradores sin aspas se caracterizan por la ausencia de componentes mecánicos que puedan sufrir desgaste por fricción. Para suplir este efecto, se utiliza una varilla de fibra de carbono sometida a cargas dinámicas cíclicas de flexión. La flexión del dispositivo se produce con un ángulo máximo y una frecuencia de trabajo ininterrumpida. A una distancia equivalente a su altura, los materiales pueden sufrir una reducción del rendimiento. Se requieren más avances en esta área para determinar de manera correcta el dinamismo del diseño final (Marpaung, 2022).

1.2.8. Curvas de velocidad del viento.

La velocidad se considera como el movimiento de la masa de aire en un periodo de tiempo cuyo valor medido corresponde a una medida vectorial uno de los instrumentos para la cuantificación de la velocidad generada por el viento en el anemómetro de cabezales. Su unidad de medida es en m/s o Km/h (Zha et al., 2023).

Es importante la toma de datos del lugar en donde se instalará el aerogenerador previo a su funcionamiento para conocer las estimaciones de energía y desarrollar curvas de comportamiento o anemogramas (Zha et al., 2023).

1.3. Aerogeneradores eólicos.

La energía eólica se considera una fuente renovable debido a su nula contaminación y su naturaleza inagotable. Esta energía es indispensable para el funcionamiento de los aerogeneradores en todo el mundo. Para aprovechar este recurso, se emplean diversas tecnologías, herramientas y dispositivos en el diseño y construcción de los aerogeneradores (Dao et al., 2019).

Un aerogenerador o conocidas como turbinas de viento es un generador de corriente eléctrica que parte de la energía cinética generada por el viento, en la actualidad una de las mayores aplicaciones de la energía eólica es la instalación de parques para la generación de energía eléctrica. Están conformados de un grupo de aerogeneradores interconectados eléctricamente (Dao et al., 2019).

Estos mecanismos aprovechan el movimiento del viento. “La resonancia surge cuando la oscilación es reforzada por un movimiento periódico. En aeroelasticidad, el aire puede inducir un movimiento oscilatorio en un cuerpo cuando su frecuencia natural y la frecuencia de aparición de vórtices o torbellinos en su estela son semejantes”. Las vibraciones inducidas por el cuerpo, se las conoce como fenómenos de VIV el desprendimiento de torbellinos se da en un rango de periodos generando fuerzas en dirección normal a la corriente incidente (Dao et al., 2019).

1.3.1. Aerogenerador eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje horizontal se caracterizan por tener palas o álabes que giran perpendicularmente a la dirección del viento. La velocidad de giro de las palas es mayor que la velocidad del viento. El rotor principal y el generador eléctrico se encuentran en la parte superior de la torre, y el conjunto debe orientarse en la dirección del viento para un funcionamiento óptimo.

Los álabes o palas son elementos aerodinámicos que capturan la energía cinética del viento y la convierten en energía mecánica de rotación. La potencia motriz se genera por la desviación del aire sobre los álabes debido a la circulación de la masa de aire alrededor del perfil aerodinámico.

Los aerogeneradores de eje horizontal se pueden clasificar en tres grupos según su principio de funcionamiento: de traslación, de variación cíclica y de eje paralelo al viento (Najafian & Jahangirian, 2023).



Figura 2. Generador eólico horizontal

Fuente: (Najafian & Jahangirian, 2023)

1.3.2. Aerogenerador eje vertical.

Este mecanismo de generación de tipo horizontal son las palas que rotan en torno al eje central, la sujeción de las palas y su diseño son aerodinámicos no precisan un sistema de orientación en la captación del viento debido a los perfiles aerodinámicos. Las características de esta máquina son que incorpora un convertidor de frecuencia conectado al rotor, este dispositivo permite controlar la tensión y corriente generada, a esto se le conoce como sincronización además permite tener mayor estabilidad, el tiempo de reacción si se producen fallas será más rápido (Mishra et al., 2022).



Figura 3. Aerogenerador de tipo vertical.

Fuente: (Mishra et al., 2022).

1.3.3. Las ventajas de este prototipo.

- Se pueden instalar varios dispositivos uno tras otro, ya que no producen el efecto frenado de la masa del aire.
- No necesitan mecanismos de orientación con respecto al viento.

- Funcionan a bajas velocidades de viento, permiten estar más cerca del suelo
- Son silenciosas, su mantenimiento es más sencillo y menos costoso.

1.3.4. Vortex Bladeless.

La empresa española Vortex Bladeless ha desarrollado una tecnología de aerogeneradores sin aspas que busca mejorar la capacidad de generación y reducir el impacto ambiental. Actualmente, cuentan con dos diseños en fase de investigación e innovación: el modelo Nano de 0.85 cm y el Tacoma de 2.75 cm.

Estos aerogeneradores tienen forma de péndulo y funcionan sin la necesidad de un rotor. Cuando el viento pasa alrededor del cilindro, se crean vórtices de presión que hacen oscilar la estructura y absorber la energía cinética del viento. La electricidad se genera por inducción electromagnética, sin necesidad de rotación sobre un eje, lo que facilita su transporte y reduce el impacto sonoro (Francis et al., 2021).

En la actualidad esta empresa permite la fabricación, instalación y funcionamiento de prototipos de base fija estos dispositivos son cilíndricos que aprovecha la velocidad del viento que pasa alrededor de la estructura que crean vórtices de presión de la masa del aire.

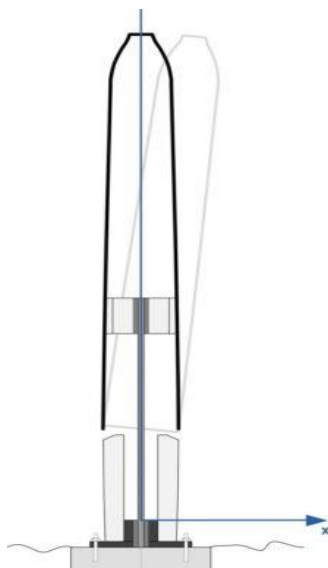


Figura 4. Aerogenerador sin aspas Tacoma Vortex bladeless

Fuente: (Francis et al., 2021)

1.3.5. Distribución de Weibull

La distribución de probabilidad del viento en la mayoría de los casos de interés energético sigue un patrón aproximado de la función de densidad de probabilidad de

Weibull. La función de densidad de probabilidad $p(v)$ de Weibull posee dos parámetros (k , c) y se expresa matemáticamente de la Ecuación (10) (Ávila et al., 2022).

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (10)$$

Los parámetros k y c de la distribución de Weibull están influenciados por factores como la ubicación y las condiciones climáticas locales. Esta distribución, una función matemática que describe la distribución de la velocidad del viento en una región específica, requiere de estos parámetros para definir con precisión su forma.

El parámetro k determina la configuración de la distribución tiende a ser más alto en casos donde la distribución de Weibull se concentra alrededor de velocidades moderadas, con una mayor probabilidad de velocidades más bajas. Por otro lado, el parámetro c impacta la escala de la distribución, afectando la amplitud de las velocidades esperadas. Un valor alto de c sugiere una mayor probabilidad de velocidades más altas, mientras que un valor bajo de c indica una mayor probabilidad de velocidades más bajas.

Es crucial señalar que ambos parámetros están estrechamente vinculados a las condiciones climáticas y geográficas de la zona donde se aplica la distribución de Weibull. Por lo tanto, para realizar predicciones precisas sobre la velocidad del viento en una región específica, es esencial conocer los valores de k y c correspondientes a esa área.

1.3.6. Cómputo de parámetros de Weibull

Los parámetros de la distribución de Weibull, denominados como forma (k) y escala (c), pueden ser estimados mediante un ajuste por mínimos cuadrados a la función de distribución acumulada $F(v)$. Este método implica minimizar la suma de los cuadrados de los residuos entre los valores observados y los teóricos predichos por la distribución de Weibull. De esta manera, se obtienen estimaciones precisas de los parámetros c y k , lo que habilita la realización de inferencias estadísticas confiables sobre fenómenos que siguen este tipo de distribución (Shu & Jesson, 2021). Es esencial destacar que la precisión del ajuste dependerá de la calidad y cantidad de los datos disponibles, así como de la elección adecuada de la función de distribución acumulada $F(v)$ correspondiente a la distribución de Weibull (Ecuación (11)).

$$F(v) = 1 * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (11)$$

Aplicando el logaritmo neperiano dos veces consecutivas a la expresión dada, se llega a una nueva fórmula relacionada con los parámetros originales, descrita por la ecuación (12). En primer lugar, al tomar el logaritmo neperiano de ambos lados de la igualdad, se transforma la potenciación en multiplicación. Posteriormente, al aplicar nuevamente el logaritmo neperiano, la multiplicación se convierte, en suma. Así, después de estas dos operaciones, se obtiene una expresión más simple y manejable algebraicamente, lo que facilita el cálculo y análisis de los parámetros de interés. Es crucial destacar que este procedimiento requiere cuidado y atención a los detalles matemáticos involucrados, asegurándose de seguir las reglas y propiedades básicas de los logaritmos neperianos (Shu & Jesson, 2021).

$$\begin{aligned} \ln(1 - F(v)) &= -\left(\frac{v}{c}\right)^k \\ \rightarrow \ln[-\ln(1 - F(v))] &= k * \ln(v) * k * \ln(c) \end{aligned} \quad (12)$$

Una vez establecida la relación lineal entre las variables implicadas, se inicia un proceso de ajuste por mínimos cuadrados a la recta representada por la ecuación $y = kx + B$. Este procedimiento implica minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los puntos observados y los predichos por la recta, permitiendo así determinar con mayor precisión los coeficientes k y B mediante la ecuación (13). Posteriormente, la recta obtenida se utiliza para realizar predicciones o extraer conclusiones sobre el comportamiento de la variable dependiente en función de la independiente. Es crucial aclarar que la confiabilidad del ajuste dependerá de la calidad y cantidad de los datos recopilados, así como de la ausencia de sesgos u otras fuentes de error sistemático que puedan comprometer la validez de los resultados finales (Shu & Jesson, 2021).

$$y = \ln[-\ln(1 - F(v))]; x = \ln(v); B = -k * \ln(c) \quad (13)$$

Tras completar el ajuste por mínimos cuadrados de la recta, la pendiente de esta última revela el valor estimado del parámetro k . Gracias a la interpretación geométrica de la pendiente como la tangente del ángulo formado entre la recta y el eje horizontal, se simplifica considerablemente su cálculo. Asimismo, el parámetro c puede ser estimado mediante la sustitución de los valores correspondientes en la ecuación (10).

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)} \quad (10)$$

Las fórmulas explícitamente utilizadas para determinar los coeficientes de la recta de regresión lineal se detallan en las ecuaciones (15) y (16). La primera ecuación aborda el cálculo del coeficiente A , mientras que la segunda se refiere al coeficiente B .

En particular, la ecuación (15) define al coeficiente A como el cociente entre la diferencia de dos productos. El numerador involucra la resta de la sumatoria de los productos individuales de cada variable x e y , multiplicada por la frecuencia relativa f_i , menos el producto de la sumatoria de las variables x e y , cada una multiplicada por su correspondiente frecuencia relativa elevada al cuadrado. El denominador está dado por la diferencia de la sumatoria de las variables x al cuadrado, multiplicadas por su correspondiente frecuencia relativa, menos el cuadrado de la sumatoria de la variable x multiplicada por su frecuencia relativa.

Por otro lado, la ecuación (16) especifica el coeficiente B como la resta del producto de la sumatoria de las variables y multiplicadas por su correspondiente frecuencia relativa y el producto de la sumatoria de la variable x multiplicada por su frecuencia relativa, menos el coeficiente A (Shu & Jesson, 2021).

$$A = \frac{\sum f_i x_i y_i - (\sum f_i x_i)(\sum f_i y_i)}{\sum f_i x_i^2 - (\sum f_i x_i)^2} \quad (15)$$

$$B = \sum f_i y_i - A \sum f_i x_i \quad (16)$$

1.4. Estimación de potencia eólica disponible

El análisis de la potencia eólica disponible es esencial en la ingeniería eléctrica, especialmente al estudiar la generación de energía mediante aerogeneradores. Esta potencia disponible en un área determinada se define por varios factores, incluyendo la velocidad y dirección del viento, la topografía, la rugosidad del terreno y las condiciones meteorológicas extremas (Villarrubia, 2013).

En consonancia, cuando un volumen de aire m se desplaza a una velocidad v , se le atribuye una energía cinética E_c , que se puede cuantificar utilizando la ecuación (11) (Adeyanju & Boucher, 2020).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (11)$$

En esta expresión, m representa la masa del aire en movimiento, y v su velocidad. Por otro lado, el caudal másico de aire (\dot{m}) que atraviesa una superficie de área (A) perpendicular a la dirección de flujo se determina utilizando la ecuación (18).

$$\dot{m} = \rho Av \quad (18)$$

En este contexto, ρ representa la densidad del aire, v es la velocidad del aire, y A es el área de la sección transversal. Asimismo, la potencia asociada al flujo de aire a través de esta sección puede calcularse mediante la ecuación (19).

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (19)$$

Al sustituir el caudal másico (\dot{m}) en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación (20):

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 \quad (20)$$

Simplificando, se llega a la ecuación (21).

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (21)$$

Por lo tanto, la potencia disponible en el aire que fluye a través de una superficie de área determinada puede calcularse conociendo la densidad del aire, el área de la sección transversal y la velocidad del aire al cubo.

La densidad del aire es influenciada por variables como la temperatura y la altitud sobre el nivel del mar. Para corregir estos efectos y obtener una estimación más precisa de la densidad, mediante la ecuación (22).

$$\rho = 1.225 * \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435} \right)} \quad (22)$$

Esta expresión considera la temperatura t en grados centígrados (°C) y la altura h sobre el nivel del mar en metros (m), lo que permite ajustar la densidad del aire de manera adecuada a las condiciones ambientales específicas.

El potencial eólico disponible de un lugar se define como la potencia media eólica por unidad de superficie durante un período de tiempo específico, suponiendo una densidad de aire constante. Sin embargo, la densidad del aire varía con la temperatura y la altitud, por lo que es necesario corregirla para obtener una estimación más precisa del potencial eólico, lo cual es posible mediante la ecuación (23). Además del potencial eólico, el factor de energía del lugar (F_e) se utiliza para evaluar la viabilidad de un proyecto eólico.

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} * \rho * F_e v^3 \quad (23)$$

1.5. Problema.

En fines del año 2023 y principios del 2024 hemos sido testigos de los racionamientos de energía eléctrica a nivel nacional por la insuficiente capacidad de cubrir la demanda, los cortes durante un período prolongado pueden afectar gravemente a diversas industrias y actividades económicas, incluidas la producción, el comercio, el turismo y otros servicios, por ello es importante la búsqueda de implementar nuevas formas de generación eólica, la idea de implementar aerogeneradores sin aspas es interesante y forma parte de la innovación continua en el campo de la energía eólica. Los aerogeneradores sin aspas, también conocidos como aero-generadores de vórtice, son un enfoque alternativo que podría tener varias ventajas, como una menor incidencia en la vida silvestre, un perfil visual más discreto y posiblemente un costo de mantenimiento más bajo.

Estos aerogeneradores sin aspas aprovechan un principio diferente al de los aerogeneradores tradicionales. En lugar de utilizar aspas para capturar la energía cinética del viento, emplean vórtices de aire generados por cilindros verticales para impulsar un generador en su base. Aunque todavía están en etapas tempranas de

desarrollo y pueden enfrentar desafíos técnicos y de escala, su potencial para ofrecer una nueva opción de generación de energía limpia y eficiente.

Para determinar la factibilidad de implementar aerogeneradores sin aspas, se requerirían estudios detallados de viabilidad técnica, económica y ambiental. Además, sería necesario considerar aspectos como la ubicación óptima para su despliegue, la capacidad de generación esperada, los costos de instalación y mantenimiento, y el impacto en el entorno local y la red eléctrica.

1.6. Objetivos.

Objetivo general.

Analizar la prefactibilidad técnica de aerogeneradores sin aspas mediante el modelamiento matemático y simulación en software Matlab Simulink de la velocidad del viento para sectores rurales del Cantón El Tambo.

Objetivos específicos.

- Analizar el recurso eólico disponible en el sitio mediante datos estadístico y determinar el potencial eólico disponible en el sitio.
- Dimensionar el área factible por medio del análisis estadístico para la instalación de aerogeneradores sin aspas.
- Determinar la capacidad máxima instalada posible del parque eólico
- Especificación del equipamiento necesario (en cantidad y características técnicas) para la instalación de un parque eólico en el sitio.

1.7. Alcance.

Con los resultados obtenidos de la presente investigación, se recomendará la factibilidad o no para la implantación de aerogeneradores sin aspas para el Cantón El Tambo, así como la cantidad óptima de aerogeneradores requeridos.

Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía para los aerogeneradores, incluyendo baterías, inversores, controladores de carga y otros componentes necesarios.

La simulación de un aerogenerador sin aspas es una buena idea para validar el diseño y el rendimiento esperado. Considera usar software especializado como ANSYS, CFD o QBlade para esta tarea.

relevante, proporcionando así un sólido punto de partida para el desarrollo del estudio en cuestión.

Primera etapa: Recolección de datos

En la primera etapa, se recopiló información sobre el recurso eólico. Se consultaron bases de datos eólicas globales, obteniendo registros históricos de la velocidad y dirección del viento en la zona de estudio. Las mediciones se obtuvieron a diferentes alturas sobre el nivel del suelo y abarcaron un periodo mínimo de 9 años.

Segunda etapa: Procesamiento de datos

Tras la recopilación de datos, estos fueron sometidos a un proceso de análisis. Primero, los registros de velocidad del viento se depuraron y organizaron meticulosamente en una hoja de cálculo. Luego, se procedió a calcular una serie de estadísticas clave, tales como la velocidad promedio, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos. Además, se empleó la distribución de probabilidad de Weibull con el fin de derivar los parámetros k y c característicos de dicha distribución.

Tercera etapa: Estimación del recurso eólico

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis probabilístico de los datos utilizando la distribución de Weibull. Este análisis permitió estimar el recurso eólico en la zona, lo cual resultó fundamental para la construcción de la curva de frecuencia acumulada y la densidad de probabilidad.

En paralelo, se llevó a cabo una detallada caracterización de la carga eléctrica para 1 y 35 viviendas del cantón El tambo, con el propósito de comprender la energía asociada a las mismas. Este proceso se fundamentó en la revisión exhaustiva de investigaciones previas realizadas en áreas rurales del Ecuador.

Es crucial destacar que esta caracterización se efectuó principalmente en términos de potencia y energía. Estos datos fueron esenciales para llevar a cabo la posterior etapa de dimensionamiento del sistema eólico sin aspas.

Cuarta etapa: Selección del aerogenerador y Simulación del sistema

A partir de los datos eólicos obtenidos, fue necesario considerar tres modelos de turbinas eólicas sin aspas: los vortex de 2.75 m, 10 m y 100 m. Para ello, se analizaron

las especificaciones técnicas de cada dispositivo, permitiendo estimar el potencial y la energía que cada uno entrega.

En base a la información recopilada, se seleccionó la turbina eólica sin aspas que mejor se ajustaba a la carga caracterizada en la fase anterior. Posteriormente, se procedió al dimensionamiento del regulador de carga, el banco de baterías y el inversor, completando así el diseño del sistema eólico sin aspas.

Simulación del sistema

Tras culminar la cuarta etapa, con el diseño propuesto, se procedió a simular el comportamiento del sistema propuesto utilizando software especializado. La simulación evaluó la generación eólica, la demanda energética y el almacenamiento a lo largo de un periodo de tiempo definido.

CAPÍTULO II.

2.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación se ajusta a diferentes tipos y niveles, los cuales se describen a continuación:

Longitudinal:

La investigación se llevó a cabo con un enfoque longitudinal debido a la necesidad de analizar el comportamiento del sistema eólico propuesto a lo largo del tiempo. Este tipo de estudio permite observar y comprender cómo el sistema se desempeña en diferentes etapas y condiciones, lo que proporciona una visión más completa y detallada de su funcionamiento a lo largo de un período prolongado.

Además, al ejecutar simulaciones durante un período de tiempo determinado, se puede evaluar la estabilidad y la eficacia del sistema bajo diversas situaciones, lo que contribuye a una evaluación más precisa de su viabilidad y utilidad en la comunidad del Tambo, Ecuador.

Retrospectiva:

La investigación adoptó un enfoque retrospectivo debido a la utilización de datos históricos de velocidad del viento en la comunidad Marcopamba del Tambo, Ecuador. Este tipo de estudio se justifica por la necesidad de examinar información previa para identificar patrones y tendencias en el comportamiento del viento a lo largo del tiempo.

Al analizar datos pasados, se puede obtener una comprensión más profunda de la variabilidad del viento en la región, lo que permite informar de manera más precisa sobre la viabilidad y el rendimiento del sistema eólico propuesto. Asimismo, esta metodología proporciona una base sólida para la toma de decisiones al considerar la información histórica como un indicador clave para evaluar la eficacia y la estabilidad del sistema en el futuro.

Cuantitativa:

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, fundamentado en la utilización de datos numéricos para analizar el potencial eólico y diseñar el sistema de aerogeneradores sin aspas. Este enfoque se justifica por la necesidad de medir de manera precisa variables como la velocidad del viento y la potencia eólica disponible en la región del Tambo, Ecuador. La recopilación y procesamiento de datos históricos de velocidad del viento permitieron realizar estimaciones objetivas sobre la energía

disponible para la generación eléctrica, proporcionando así una base sólida para el diseño del sistema.

Nivel de investigación

El nivel de investigación del estudio es exploratorio. Se encuentra en esta etapa porque se adentra en un terreno relativamente nuevo y poco explorado: los aerogeneradores sin aspas. Su objetivo primordial radica en comprender a fondo el potencial y las limitaciones de esta tecnología, específicamente en el contexto de una comunidad rural. Para lograr este propósito, emplea una variedad de métodos de investigación, como el análisis de datos y simulaciones, con el fin de recopilar y analizar información de manera exhaustiva.

Los resultados obtenidos serán de gran utilidad para guiar futuras investigaciones y el desarrollo continuo de esta tecnología. No obstante, es importante destacar que el estudio no busca ofrecer resultados definitivos o generalizables en esta etapa. Más bien, su principal función es sentar las bases sólidas para investigaciones posteriores y aplicaciones prácticas relacionadas con los aerogeneradores sin aspas.

2.2. Método y diseño de la investigación

La investigación en curso se desarrolló en base a diferentes métodos, los cuales se detallan a continuación.

Método general

El proceso metodológico general de la investigación sigue una secuencia de pasos que se ajusta al método científico, caracterizado por su enfoque sistemático para adquirir y evaluar conocimientos. Inicia con la observación del creciente interés en las energías renovables y la demanda de fuentes de energía sostenibles en áreas rurales, lo que conduce a la definición precisa del problema: determinar la viabilidad de los aerogeneradores sin aspas como una alternativa de energía renovable en estas comunidades.

Método específico

El enfoque metodológico específico adoptado para esta investigación se basa en un método descriptivo-predictivo, que combina la descripción detallada de las características del recurso eólico con la capacidad de prever el rendimiento futuro del sistema de aerogeneradores sin aspas en una comunidad rural determinada.

Diseño de la investigación

Objetivo: Evaluar la viabilidad técnica de los aerogeneradores sin aspas para proporcionar energía renovable a sectores rurales del cantón El Tambo.

Hipótesis: Los aerogeneradores sin aspas pueden ser una fuente viable de energía renovable para sectores rurales del cantón El Tambo.

Variables:

- **Variable independiente:** Velocidad del viento
- **Variable dependiente:** Potencia generada

Procedimiento:

1. Recopilación de datos:

- Obtener datos históricos de velocidad del viento de una estación meteorológica cercana o de una base de datos en línea.

2. Análisis de datos:

- Estimar la potencia eólica disponible en los sectores rurales seleccionados.

3. Selección del aerogenerador:

- Seleccionar un aerogenerador sin aspas adecuado para las condiciones específicas del sector rural del Tambo, Ecuador, teniendo en cuenta la potencia eólica disponible.

4. Diseño del sistema:

- Determinar el número de los aerogeneradores necesarios para satisfacer las necesidades energéticas del sector rural del Tambo, Ecuador.
- Diseñar el sistema eléctrico, incluyendo el almacenamiento de energía.

5. Evaluación de la viabilidad técnica:

- Evaluar la viabilidad técnica del sistema propuesto, teniendo en cuenta factores como:
 - Costos de inversión y operación

2.3. Técnicas e instrumentos de recopilación de datos

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante la búsqueda en línea de información meteorológica en las bases de datos del Atlas Eólico Mundial. En este contexto, la plataforma ofrece la posibilidad de descargar los datos en un archivo de Excel de forma ordenada, lo que convirtió dicho archivo en el instrumento fundamental para la presente investigación.

2.4. Técnicas de procesamiento de datos

En este estudio, se emplearon diversas técnicas de procesamiento de datos para analizar y evaluar el rendimiento del sistema eólico sin aspas. En primer lugar, se utilizó Microsoft Excel para realizar un análisis inicial de los datos en bruto de velocidad del viento. Esta herramienta permitió organizar y manipular los datos de manera eficiente, calcular estadísticas básicas como la velocidad media del viento, la desviación estándar y la distribución de frecuencias.

Posteriormente, se empleó MATLAB para llevar a cabo un análisis más detallado de los datos y generar gráficas que proporcionaran una representación visual clara de los resultados. MATLAB también se utilizó para calcular parámetros estadísticos adicionales y realizar análisis más avanzados, como la distribución de Weibull.

Además, se utilizó Simulink para simular el sistema eólico sin aspas. Esta herramienta permitió modelar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones, como variaciones en la velocidad del viento.

En conjunto, estas técnicas de procesamiento de datos permitieron realizar un análisis completo del sistema eólico sin aspas, desde la recolección y análisis de datos iniciales hasta la simulación del sistema en condiciones simuladas.

2.5. Selección del lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en toda la comunidad de Marcopamba, ya que el Atlas Eólico Mundial permite obtener datos de medición del viento en un área determinada. Esto implica que el dimensionamiento realizado en este estudio es aplicable a cualquier punto de la comunidad. Al tratarse de generadores eólicos sin aspas, los factores de ruido, impacto ambiental y disponibilidad de terreno se consideran irrelevantes, ya que las turbinas sin aspas, especialmente las de tipo Vortex, solucionan este tipo de problemas inherentes a las turbinas eólicas tradicionales.

2.6. Ubicación del proyecto.

El estudio se llevó a cabo en territorio ecuatoriano, específicamente en la provincia del Cañar, en la comunidad de Marcopamba (ver Figuras 5 y 6). El cantón de El Tambo, donde se realizó la investigación, tiene una población de 9475 habitantes entre hombres y mujeres.

Los beneficiarios del proyecto fueron alrededor de 35 familias que se encuentran asentadas en zonas rurales del cantón. Cabe destacar que este cantón se encuentra a 2500 metros sobre el nivel del mar, por lo que su clima es frío y presenta relieves que superan los 4000 metros de altura.

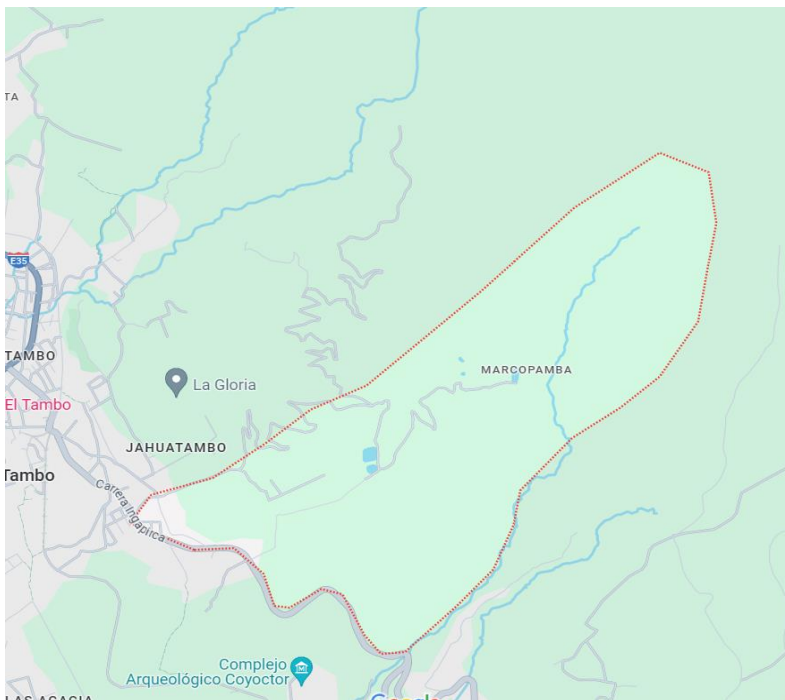


Figura 5. Ubicación del sitio Cantón El Tambo de la comunidad Marcopamba

Fuente: (Google Maps, 2024)

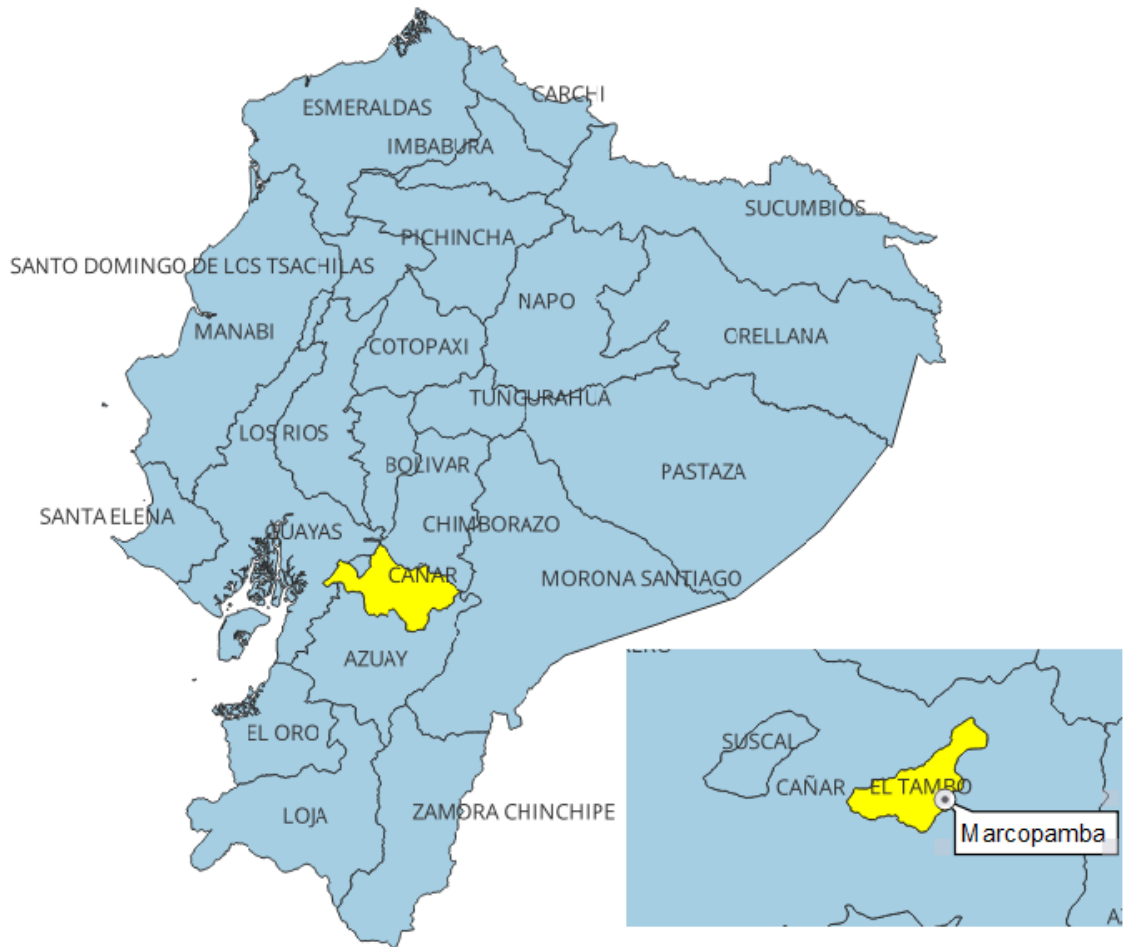


Figura 6. Ubicación del lugar provincia Cañar Cantón El Tambo elaborado QGIS 3.34.1.

Fuente: (Autor)

2.7. Obtención de datos.

Para evaluar el potencial eólico en el cantón El Tambo de la comunidad de Marcopamba, se llevó a cabo un análisis del historial registrado de las velocidades del viento a lo largo de 9 años, desde 2008 hasta 2017. Este análisis fue fundamental, ya que el modelo del atlas solar emplea datos históricos comprendidos entre esos años.

Se decidió utilizar esta fuente de datos por dos motivos principales. En primer lugar, proporciona datos históricos por año, mes y día, lo que permite un análisis más preciso del potencial eólico. En segundo lugar, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología solo ofrece datos históricos promediados por año, lo que no es tan útil para este tipo de estudios.

Para obtener los datos, se accedió al sitio web correspondiente¹ y se parametrizó el sitio de interés, que en este caso es Cañar – El Tambo. Este proceso se ilustra en la Figura 7.

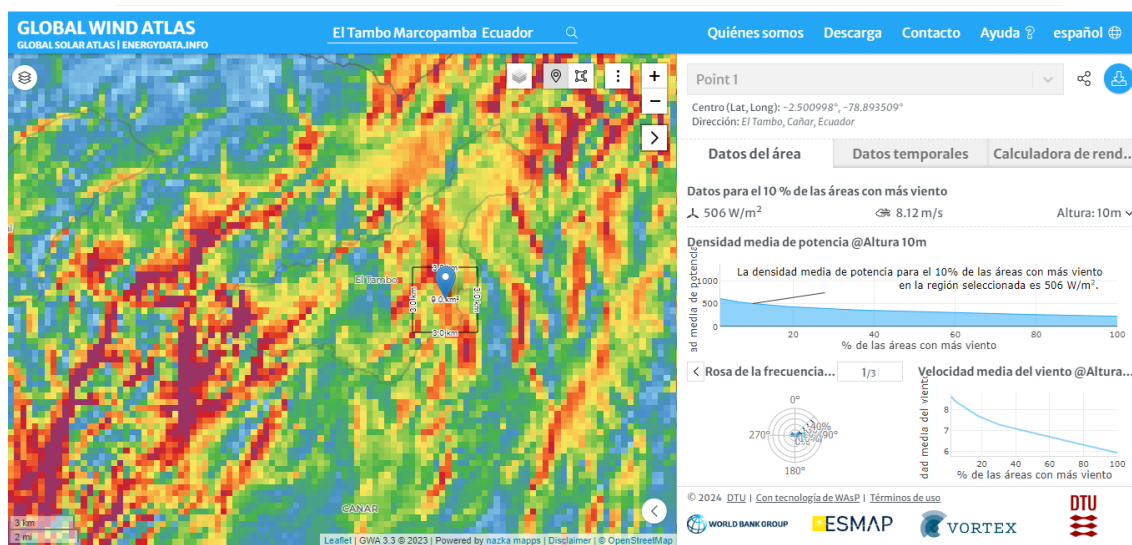


Figura 7. Atlas eólico mundial

Fuente: (DTU Wind Energy & World Bank Group, 2018)

El estudio se centró en un perfil de velocidad del viento que abarcaba tres altitudes: 10 metros, 50 metros y 100 metros (ver Figura 8). Se observaron variaciones significativas en la velocidad del viento en cada una de estas altitudes.

A una altura de 10 metros, la velocidad del viento osciló entre un mínimo de 2,94 m/s y un máximo de 4,09 m/s. Al aumentar la altura a 50 metros, las fluctuaciones aumentaron, con velocidades que oscilaron entre 5,84 m/s y 6,93 m/s. Finalmente, a 100 metros, se registraron las velocidades más elevadas, con el viento soplando entre 7,16 m/s y 8,13 m/s.

Los patrones de velocidad del viento diarios mostraron un comportamiento bastante uniforme a diversas altitudes, aunque con algunas diferencias importantes en cuanto a su magnitud (ver Figura 8). La dirección general del viento se mantuvo relativamente constante durante todo el día, mientras que la fuerza con la que soplaba tendió a incrementarse conforme se ascendía en altitud.

¹ Atlas eólico mundial, disponible en: [Global Wind Atlas](https://globalwindatlas.com/)

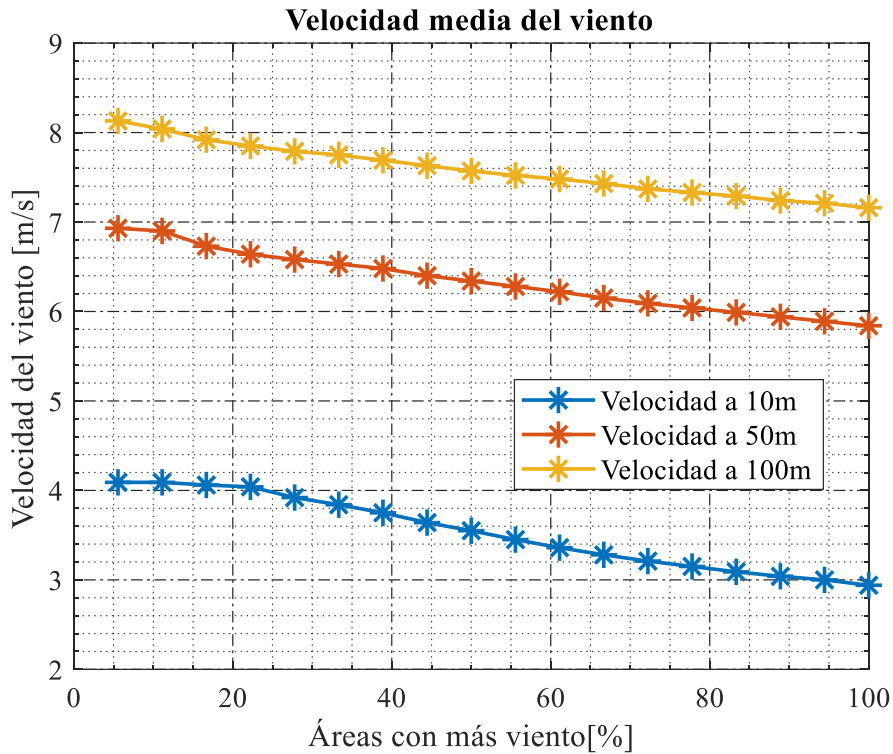


Figura 8. Velocidad media del viento a diferentes alturas, El Tambo - Ecuador

Fuente: Autor

2.8. Análisis de datos eólicos

En primer lugar, se recopilaron los datos del Atlas Eólico Mundial para el sitio específico de estudio coordenadas -2.500998, -78.893509.. Posteriormente, se realizó un procesamiento exhaustivo de la información para ordenarla y representarla de forma clara y comprensible. Para ello, se utilizaron diversas herramientas como tablas e histogramas.

La visualización de los datos facilitó la evaluación del potencial de energía eólica disponible en el sitio. A partir de la información organizada y representada gráficamente, fue posible identificar las zonas con mayor potencial eólico, así como las características del viento en diferentes periodos del año.

La velocidad promedio horaria del viento se organizó en diversas secciones para su análisis. En términos simples, se fragmentó el rango de variación de la velocidad del viento en diferentes secciones y se cuantificó la distribución de frecuencias del viento en cada una de ellas, los datos obtenidos de las coordenadas -2.500998, -78.893509. Esta información detallada se encuentra disponible en la Tabla 1 y en la Figura 9.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico de la velocidad del viento. Para ello, se calcularon diversos indicadores como la media, mediana, moda, desviación

estándar, varianza, valor mínimo y valor máximo. Estos cálculos se realizaron para los datos de cada año considerado en el estudio, desde el 2008 hasta el 2017.

Tabla 1.

Frecuencia de velocidades en el Tambo - Ecuador

Rango de velocidades (m/s)	Frecuencia
0,3	3
1,2	8
2,1	12
3	19
4,5	23
5,4	31
6,3	41
7,2	38
8,1	29
9	17
10,2	5
11,1	3

Fuente: Autor

En el año 2008 la media se situó en 2.85 m/s, el valor más bajo del período. A partir de entonces, experimentó un aumento del 5.5% en 2009, alcanzando un valor de 3.01 m/s (ver Tabla 2).

En 2010, se observó una leve disminución de la media a 2.98, seguida de una caída más pronunciada en 2011 hasta 2.91, lo que representó una disminución del 2.1% con respecto al año anterior (ver Tabla 2).

A partir de 2012, la media comenzó a aumentar de forma más significativa. Ese año, alcanzó un valor de 3.29 m/s, lo que representó un aumento del 13.1% con respecto a 2011 (ver Tabla 2). Este cambio podría indicar un punto de inflexión en las tendencias del conjunto de datos. Asimismo, en 2013 y 2014, la media continuó aumentando a un ritmo moderado, alcanzando valores de 3.26 m/s y 3.36 m/s, respectivamente.

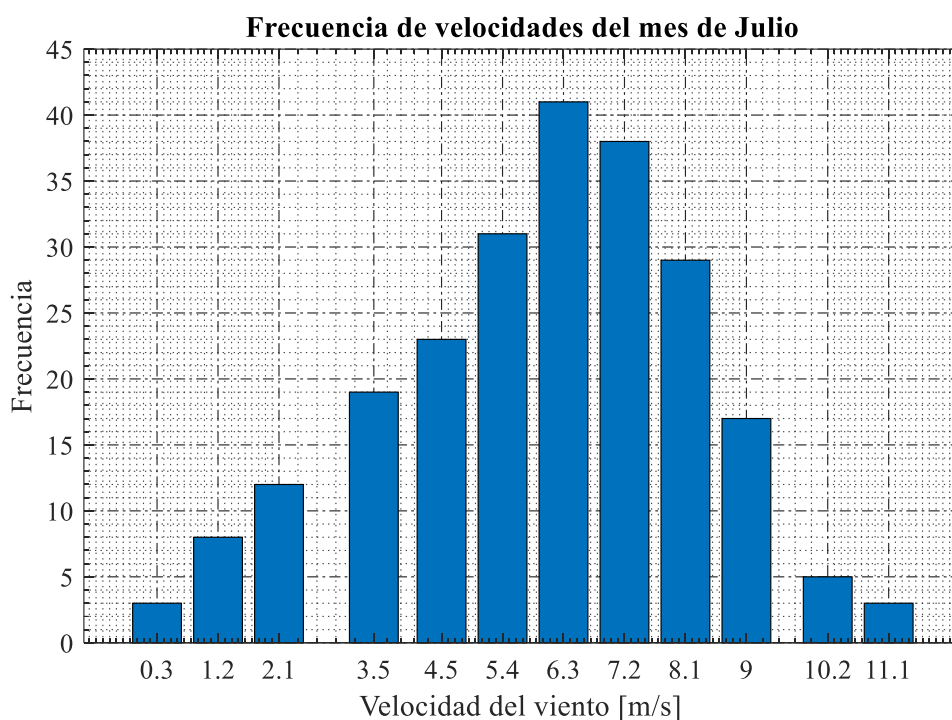


Figura 9 . Frecuencia de velocidades, El Tambo - Ecuador.

Fuente: Autor

Tabla 2.

Análisis estadístico de velocidades del viento en los periodos 2008 - 2017 en el Tambo - Ecuador

Base	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Media	2.85	3.01	2.98	2.91	3.29	3.26	3.36	3.67	3.26	3.04
Mediana	2.85	3.01	2.98	2.91	3.29	3.26	3.36	3.67	3.26	3.04
Moda	2.49	2.62	2.60	2.54	2.87	2.85	2.93	3.20	2.85	2.65
Desviación estándar	0.39	0.41	0.41	0.40	0.45	0.45	0.46	0.50	0.45	0.42
Varianza	0.16	0.18	0.17	0.17	0.21	0.21	0.22	0.26	0.21	0.18
Mínimo	2.25	2.38	2.35	2.30	2.60	2.58	2.65	2.90	2.58	2.40
Máximo	3.68	3.89	3.84	3.76	4.25	4.21	4.34	4.74	4.21	3.93

Fuente: Autor

En 2015, la media alcanzó su valor máximo, situándose en 3.67 m/s (ver Tabla 2). Este valor representó un aumento significativo del 9.4% con respecto a 2014, lo que sugiere un cambio sustancial en los datos durante el año.

Posteriormente, la media experimentó un descenso en 2016 y 2017, alcanzando valores de 3.26 y 3.04, respectivamente (ver Tabla 2). Esta última cifra representó una disminución del 17.2% con respecto al valor máximo de 2015.

2.9. Aplicación de la probabilidad de Weibull

Para el estudio de la velocidad del viento en la ciudad de El Tambo, provincia de Cañar, Ecuador, se empleó la función de densidad de probabilidad de Weibull. Esta elección se justifica por las características geográficas y climáticas de la región, las cuales generan patrones irregulares y fluctuantes en la velocidad del viento. En consecuencia, se realizó el cálculo de los parámetros estadísticos de Weibull, que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Cómputo de parámetros estadísticos de Weibull.

Velocidad (m/s)	ni	fi	Fi	yi	xi	fi_xi	fi_xi2	fi_yi	fi_xi_yi
0.3	3	0.01	0.01	-4.33	-1.20	-0.02	0.02	-0.06	0.07
1.2	8	0.03	0.05	-3.01	0.18	0.01	0.00	-0.11	-0.02
2.1	12	0.05	0.10	-2.25	0.74	0.04	0.03	-0.12	-0.09
3.5	19	0.08	0.18	-1.60	1.25	0.10	0.13	-0.13	-0.17
4.5	23	0.10	0.28	-1.10	1.50	0.15	0.23	-0.11	-0.17
5.4	31	0.14	0.42	-0.61	1.69	0.23	0.38	-0.08	-0.14
6.3	41	0.18	0.60	-0.09	1.84	0.33	0.61	-0.02	-0.03
7.2	38	0.17	0.76	0.37	1.97	0.33	0.65	0.06	0.12
8.1	29	0.13	0.89	0.80	2.09	0.26	0.55	0.10	0.21
9	17	0.07	0.97	1.21	2.20	0.16	0.36	0.09	0.20
10.2	5	0.02	0.99	1.47	2.32	0.05	0.12	0.03	0.07
11.1	3	0.01	1.00						
Total	229	1.00				1.65	3.07	-0.34	0.06

Fuente: Autor

Los datos numéricos extraídos de la Tabla 3 se sustituyeron en las ecuaciones (24), (25) y (26) para llevar a cabo los cálculos pertinentes de los coeficientes A, B y c. De manera consecutiva, se exponen los detalles de este procedimiento.

$$A = \frac{0.0634 - 1.6486 * (-0.3377)}{3.0749 - 1.6486^2} = 1.7371 \quad (24)$$

$$B = -0.3377 - (1.7371 * 1.6486) = -3.2015 \quad (25)$$

$$c = e^{-\left(\frac{-3.2015}{1.7371}\right)} = 6.3154 \quad (26)$$

Luego de haber determinado los factores de forma ($A = 1,7371$) y escala ($c = 6.3154$), se procedió a introducirlos en la ecuación (27). Esto con el objetivo de obtener los valores correspondientes a la función densidad de probabilidad de Weibull ($p(v)$).

$$p(v) = \left(\frac{1.7371}{6.3154}\right) * \left(\frac{v_i}{6.3154}\right)^{1.7371-1} * e^{-\left(\frac{v_i}{6.3154}\right)^{1.7371}} \quad (27)$$

Primero, se sustituyeron los valores de los factores de forma y escala en la ecuación (11), la cual representa la función densidad de probabilidad de Weibull en relación con la velocidad del viento. Luego, se calcularon los valores correspondientes a cada punto de la función utilizando la fórmula establecida en la ecuación mencionada. En la Tabla 4 se expusieron los resultados.

Posteriormente, se representó gráficamente la función densidad de probabilidad de Weibull utilizando los valores calculados (ver Figura 10). Esta representación gráfica permitió visualizar la distribución de probabilidades asociada a los datos de velocidad del viento correspondientes a la ciudad de El Tambo, provincia de Cañar, Ecuador.

Al examinar los datos, se notó que la velocidad del viento (V_i) variaba desde 0,3 m/s hasta 11 m/s. Además, se observó que la probabilidad (PV) asociada a cada velocidad variaba, siendo más alta en velocidades más bajas y disminuyendo gradualmente a medida que aumentaba la velocidad del viento.

Tabla 4.

Resultados de la probabilidad de Weibull.

V_i (m/s)	PV
0,3	0,0290
1,2	0,0765
2,1	0,1054
3,5	0,1244
4,5	0,1230
5,4	0,1144
6,3	0,1014
7,2	0,0863
8,1	0,0708
9	0,0561
10	0,0393
11	0,0291

Fuente: Autor

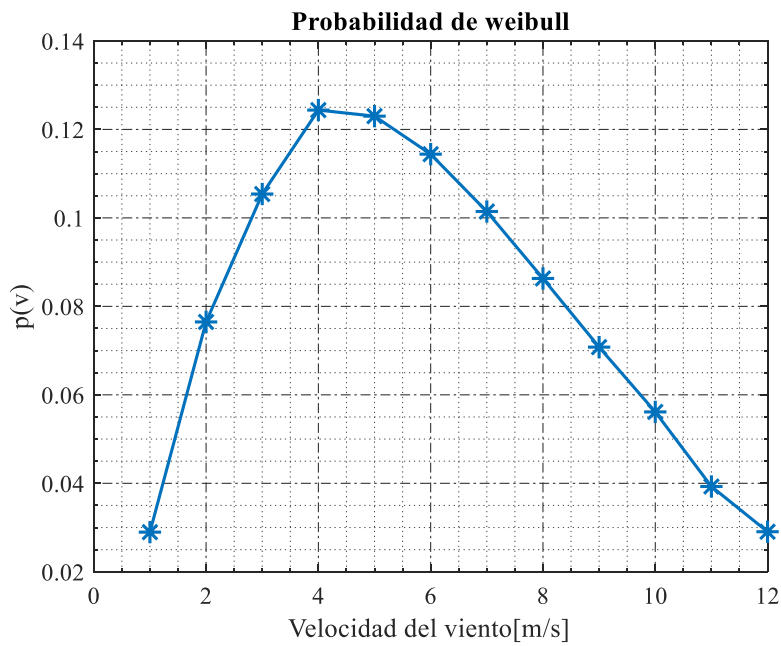


Figura 10. Probabilidad de Weibull para velocidades del viento de El Tambo - Ecuador.

Fuente: Autor

En la evaluación del recurso eólico en El Tambo, Ecuador, se observó que la mayoría de las mediciones de velocidad del viento fueron predominantemente inferiores a 7-8 m/s, indicando que el recurso eólico en esta región es de baja a moderada intensidad. Apenas alrededor del 10% de las mediciones excedieron los 9 m/s. La velocidad promedio, tal como se registra en la (Figura 11), fue de aproximadamente 5.4 m/s

Tabla 5

Distribución de frecuencias de El tambo - Ecuador

Velocidad (m/s)	Ni (h)	Frecuencia relativa fi	Frecuencia relativa acumulada Fi	Frecuencia relativa acumulada complementaria Fi
0,3	3	0,0131	0,0131	0,9869
1,2	8	0,0349	0,0480	0,952
2,1	12	0,0524	0,1004	0,8996
3,5	19	0,0830	0,1834	0,8166
4,5	23	0,1004	0,2838	0,7162
5,4	31	0,1354	0,4192	0,5808
6,3	41	0,1790	0,5983	0,4017
7,2	38	0,1659	0,7642	0,2358
8,1	29	0,1266	0,8908	0,1092
9	17	0,0742	0,9651	0,0349
10,2	5	0,0218	0,9869	0,0131
11,1	3	0,0131	1,0000	0
Total	229	1,0000	-	

Fuente: Autor

El incremento de la frecuencia relativa acumulada en la Tabla (5) se basa en la suma progresiva de las frecuencias relativas de cada intervalo de velocidad. Esto muestra cómo, a medida que se aumenta la velocidad del viento, se acumula un

porcentaje cada vez mayor del total de mediciones, reflejando la distribución de las velocidades del viento en la región.

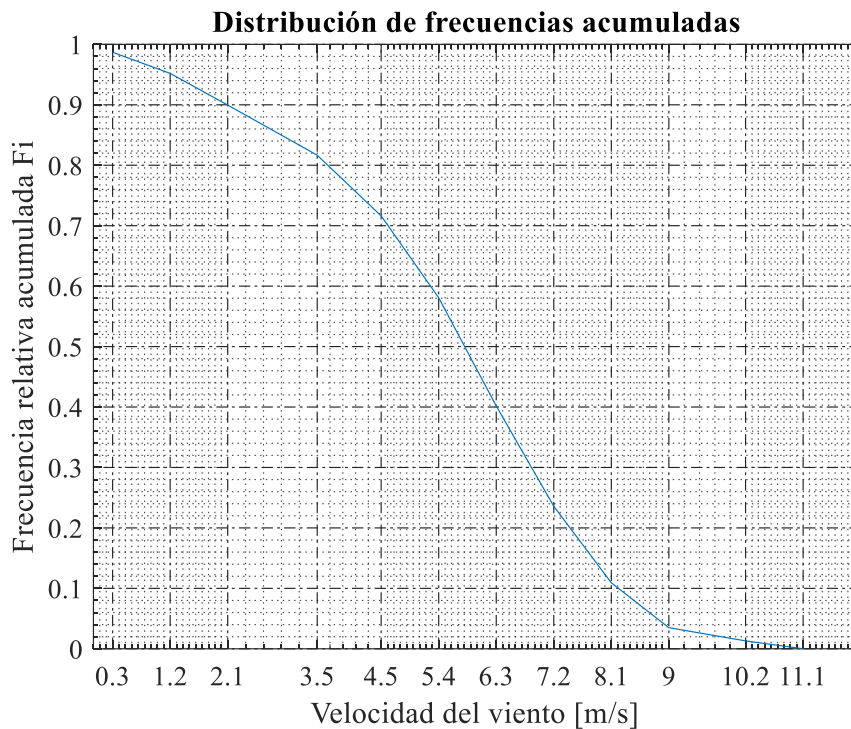


Figura 11. Frecuencias acumuladas para velocidades del viento de El Tambo - Ecuador.

Fuente: Autor

2.10. Estimación de la potencia eólica disponible

Para realizar el cómputo del potencial eólico disponible en El Tambo, provincia de Cañar, Ecuador, se calcularon la densidad del aire en el sitio, la velocidad media del viento y el factor de energía. A continuación, se presenta el detalle de los cálculos realizados.

2.10.1. Cómputo de la densidad

El poblado de El Tambo se ubica a una altitud de 2500 metros sobre el nivel del mar y cuenta con una temperatura promedio de aproximadamente 5°C. En ese contexto, se aplicó la altura y la temperatura del lugar para calcular la densidad del aire mediante la ecuación (28).

$$\rho = 1.225 * \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435} \right)} \quad (28)$$

$$\rho = 1.225 * \left(\frac{288}{5 + 273} \right) e^{-\left(\frac{2500}{8435} \right)}$$

$$\rho = 0.94 \frac{kg}{m^3}$$

2.10.2. Cómputo de la velocidad media

Para determinar la velocidad media registrada en el Tambo, se utilizaron los datos de velocidad del viento, junto con el parámetro de escala (c) y forma (k), y la función de gamma (Γ). Los parámetros mencionados se habían calculado en secciones anteriores, por lo que se procedió a reemplazarlos en la ecuación (29). De este modo, se obtuvo un resultado de 5.62 m/s aproximado a la velocidad promedio existente con referencia a la velocidad media que nos dio como 5.40 m/s para el sitio de estudio en cuestión.

Hemos identificado un error en la estimación inicial de la velocidad media, previamente reportada como 5.62 m/s. Corregimos este valor utilizando los parámetros recalculados de la distribución de Weibull, resultando en una velocidad media ajustada de 4.5 m/s. Este ajuste se refleja en la ecuación revisada:

$$\langle v \rangle = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)$$

$$\langle v \rangle = 6.3154 * \Gamma \left(1 + \frac{1}{1.7371} \right) = 4.50 \frac{m}{s} \quad (29)$$

2.10.3. Cómputo del factor de energía

El factor de energía para el Tambo se calculó en base a la distribución de Weibull obtenida en secciones anteriores. Específicamente, se empleó el factor de forma (k). De este modo, al reemplazar los parámetros en la ecuación (30) se obtiene un valor de 2.23 como factor de energía para el lugar de estudio en mención.

$$F_e = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

(30)

$$F_e = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{1.7371}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{1.7371}\right)} = 2.23$$

2.10.4. Compuo de la potencia eólica disponible

La cuantificación de la energía eólica disponible en el Tambo se realizó a partir de la densidad del aire, la velocidad del viento y otros factores son elementos clave como indicadores significativos se detalla en la ecuación (31). La potencia eólica promedio de 187.58 W/m² que se menciona es un indicador significativo de la cantidad de energía que podría ser capturada en esa área.

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} * 0.94 * 2.23 * 5.62^3$$

(31)

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = 187.58 \frac{W}{m^2}$$

CAPÍTULO III.

3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EÓLICO.

Para dimensionar el campo eólico con aerogeneradores Vortex Bladeless en el Tambo, se comenzó por determinar la potencia disponible en el viento. Esto consistió en calcular la cantidad de energía que se puede extraer de una determinada área barrida atravesada por el viento. Esta información, junto al rendimiento del dispositivo, permitió estimar la producción de un solo aerogenerador bajo condiciones específicas.

Un paso crucial fue analizar el efecto de la interacción entre aerogeneradores, ya que esta puede afectar su rendimiento individual. Se estudió cómo la estela de un aerogenerador incide en la velocidad del viento que llega a los aerogeneradores posteriores, y cómo esto afecta su producción de energía.

3.1. Potencia disponible en el viento

Para calcular la energía extraíble del viento que atraviesa el área barrida por el mástil del generador Vortex, se partió de las especificaciones dimensionales proporcionadas por la empresa desarrolladora de la tecnología (González, 2019). Estas especificaciones se basan en un aerogenerador de 100 metros de altura, al que posteriormente se le aplicó un factor de escala para estimar su funcionamiento en dispositivos de menor tamaño.

Se analizaron dispositivos de 2.75 metros y 10 metros de altura, cada uno con un espacio interno designado para el alternador. La siguiente tabla presenta la altura total, la altura de referencia y el diámetro para cada tamaño de dispositivo.

Tabla 6.

Dimensión total de aerogeneradores sin aspas Vortex, para estudio de El Tambo.

Altura total (m)	Altura de referencia base (m)	Diámetro base (m)
100	25.5	9.236
10	2.55	0.9236
2.75	0.70125	0.25399

Fuente: (González, 2019)

3.2. Cálculo del área de barrido de vortex

Para determinar el área de barrido total, se empleó la ecuación (34), la cual depende del área del dispositivo (A_{disp}) y del área de oscilación ($A_{oscilación}$). En este sentido, se aplicaron las ecuaciones (32) y (33) respectivamente, para cada vórtice elegido para el estudio. Los resultados del área de barrido para cada vórtice se detallan en la Tabla 7.

$$A_{disp} = \int_{h_{ref}}^{h_{max}} \left(d_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha - a \frac{\pi}{60} (h - h_0) \right) dh \quad (32)$$

$$A_{oscilación} = \frac{\pi * r^2 * (giro)}{360} \quad (33)$$

$$A_{total} = A_{disp} + A_{oscilación} \quad (34)$$

Tabla 7

Cálculo de área de barrido para diferentes Vortex

Altura del vórtice (m)	Área del dispositivo (m)	Área de oscilación (m ²)	Área total de barrido (m ²)	Factor de escala
100	7.4707	2.9061	10.3768	0.1
10	7.4707	2.9061	10.3768	1
2.75	0.565	0.2198	0.7847	1

Fuente: (González, 2019)

En la Tabla 7 se evidenció que el área de barrido más extensa fue de 10.37 metros, la cual correspondía al vórtice sin aspas de 10 metros. Cabe destacar que el factor de escala para los vórtices de 2.75 metros y 10 metros fue de 1, mientras que para la estructura de 100 metros se estableció en 0.1.

Explicación de los Cálculos y el Factor de Escala:

Cálculo de las Áreas de Barrido: El área de barrido de los aerogeneradores Vortex se calculó considerando las dimensiones proporcionadas por el fabricante

y los movimientos oscilatorios posibles del dispositivo. Para cada altura de Vortex, se calcularon el área de dispositivo y el área de oscilación usando las siguientes fórmulas:

$$\text{Área de Dispositivo} = \pi \times (\text{diámetro}/2)^2$$

$$\text{Área de Oscilación} = \text{amplitud de oscilación} \times \text{altura}$$

El área total de barrido es la suma del área de dispositivo más el área de oscilación. Los cálculos específicos para cada altura del Vortex se basaron en estas fórmulas, ajustadas para las dimensiones específicas de cada modelo.

Uso del Factor de Escala: El factor de escala se aplica para ajustar los cálculos del área de barrido en función del tamaño real del dispositivo. Para el Vortex de 100 metros, el factor de escala de 0.1 se utilizó para reflejar una reducción proporcional en la escala de operación, dado que este tamaño es principalmente conceptual y no se ha construido a escala completa como los modelos más pequeños. Por el contrario, los modelos de 10 metros y 2.75 metros son operativos a escala completa, por lo tanto, no requieren ajuste, estableciéndose su factor de escala en 1.

3.3. Cálculo de velocidad media a diferentes alturas

La velocidad media se calculó a 2,75 m (ver Figura 12) y a 10 m (ver Figura 13) utilizando la ley exponencial de Hellman. Para ello, se empleó la altura máxima y de referencia de cada vórtice en cuestión, así como un coeficiente de fricción para praderas que se establece en 0.15 (Vera, 2020).

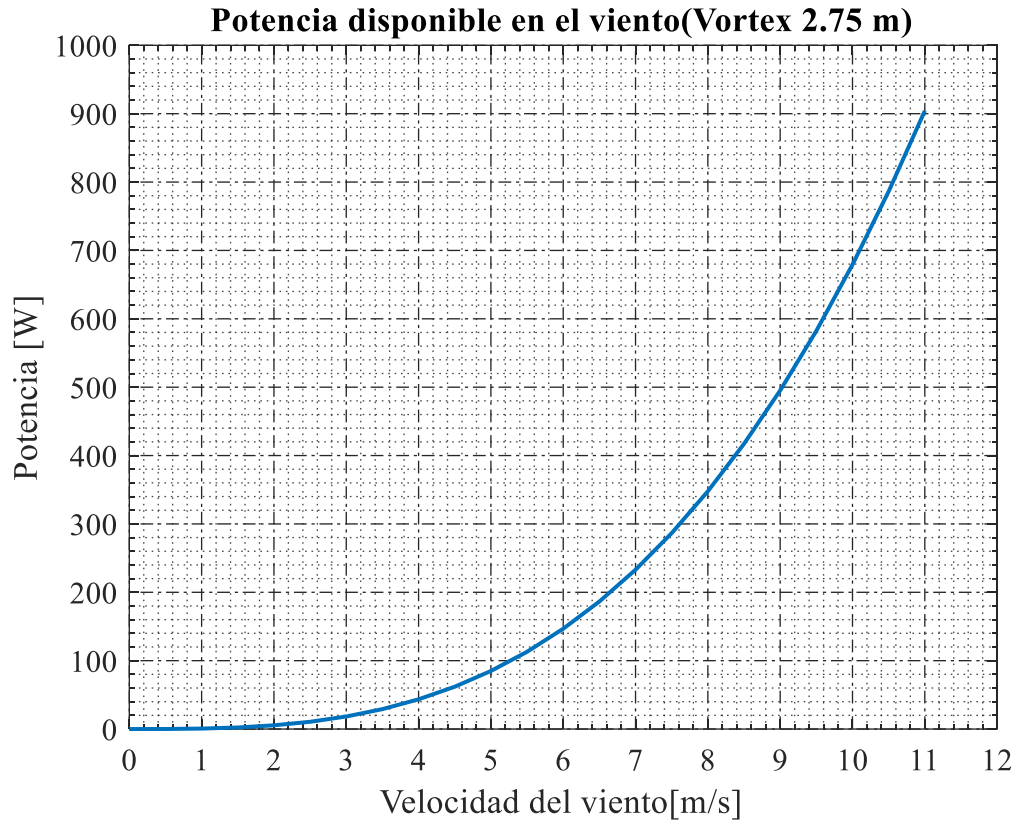


Figura 12. Potencia disponible para Vortex de 2.75 m

Fuente: Autor

La Figura 12 se evidenció que el Vortex de 2.75 metros tenía la capacidad de generar un total de 900 vatios con una velocidad de 11 m/s. Por otro lado, la Figura 13 demostró que el Vortex de 10 metros podía generar 12000 vatios con una velocidad de 11 m/s.

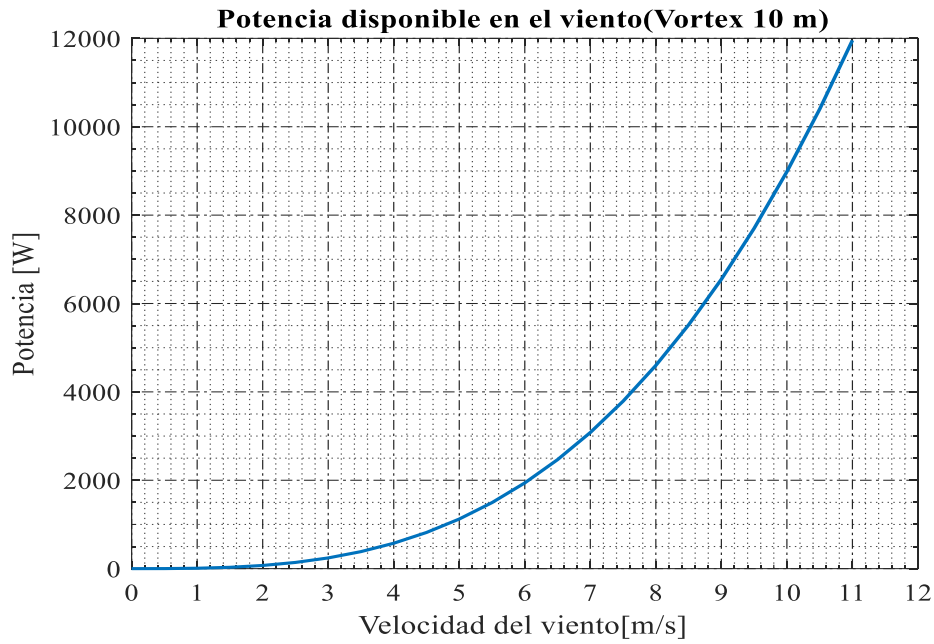


Figura 13. Potencia disponible para Vortex de 10 m.

Fuente: Autor

3.4. Compuo del coeficiente de potencia

En primer lugar, se calculó la potencia del viento presente en el área barrida por el dispositivo. Posteriormente, se determinó la potencia máxima teórica. El objetivo de este proceso era calcular el coeficiente de potencia. Los resultados de estos cálculos para los vórtices de 2.5 y 10 metros de altura se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Cálculo del coeficiente de potencia para diferentes vórtices.

Velocidad del viento (m/s)	Vortex (2.75 m)	Vortex (10 m)
0.3	0.041	0.041
0.3	0.109	0.109
1.2	0.151	0.151
2.1	0.178	0.178
3.5	0.176	0.176
4.5	0.164	0.164
5.4	0.145	0.145
6.3	0.123	0.123
7.2	0.101	0.101
8.1	0.080	0.080
9	0.056	0.056
10.2	0.042	0.042

Fuente: Autor

3.5. Curvas de potencia para los aerogeneradores tipo Vortex

En primer lugar, se calculó la potencia del aerogenerador a partir del área total barrida, la densidad del viento en el sitio, el factor de energía, el coeficiente de potencia y el cubo de la velocidad del viento. Todos estos parámetros fueron calculados secuencialmente en secciones anteriores. Los resultados para el Vortex de 2,75 m y 10 m se presentan en las Figuras 14 y 15, respectivamente.

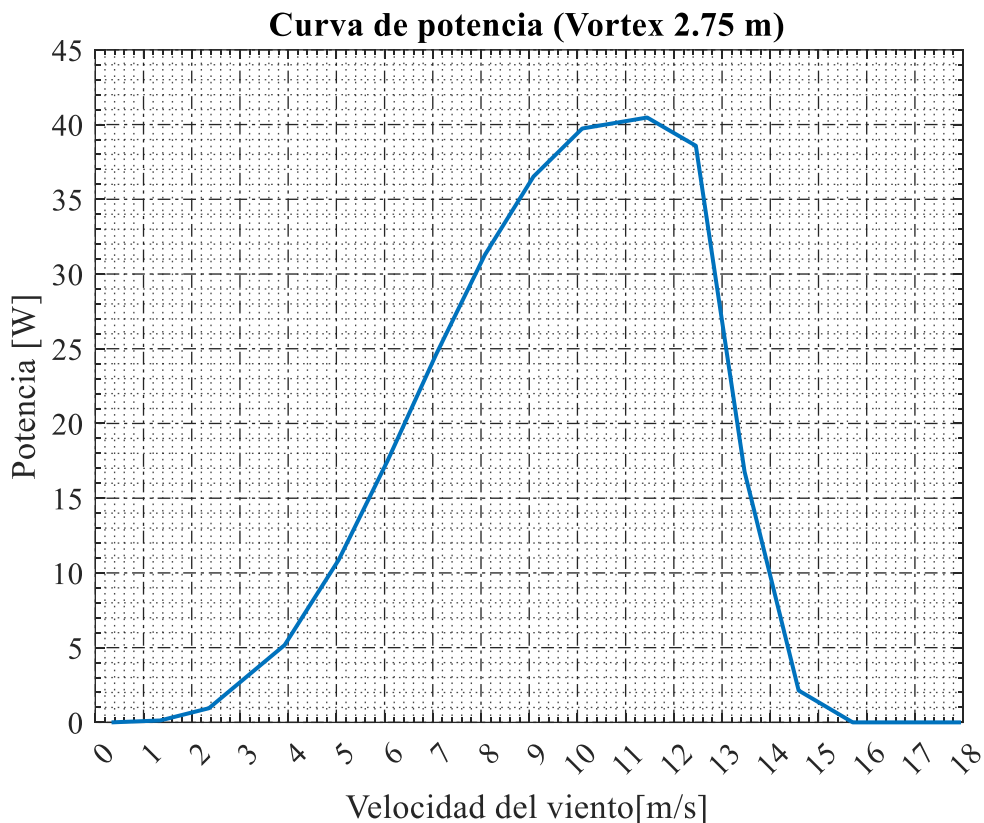


Figura 14 . Curva de potencia para Vortex de 2.75 m

Fuente: Autor

De las curvas analizadas, se logró determinar la capacidad máxima de cada tipo de aerogenerador. El modelo de 2,75 metros de altura alcanzó una potencia máxima de 40,47 W con una velocidad, mientras que el modelo de 10 metros de altura llegó a los 535,16 W.

Esta capacidad máxima se encuentra directamente relacionada con la velocidad del viento. En el punto donde el coeficiente de potencia y la velocidad del viento convergen en su valor más alto, se obtiene la máxima potencia posible del aerogenerador. Este punto se observa alrededor de los 11 a 11,5 m/s de velocidad del viento.

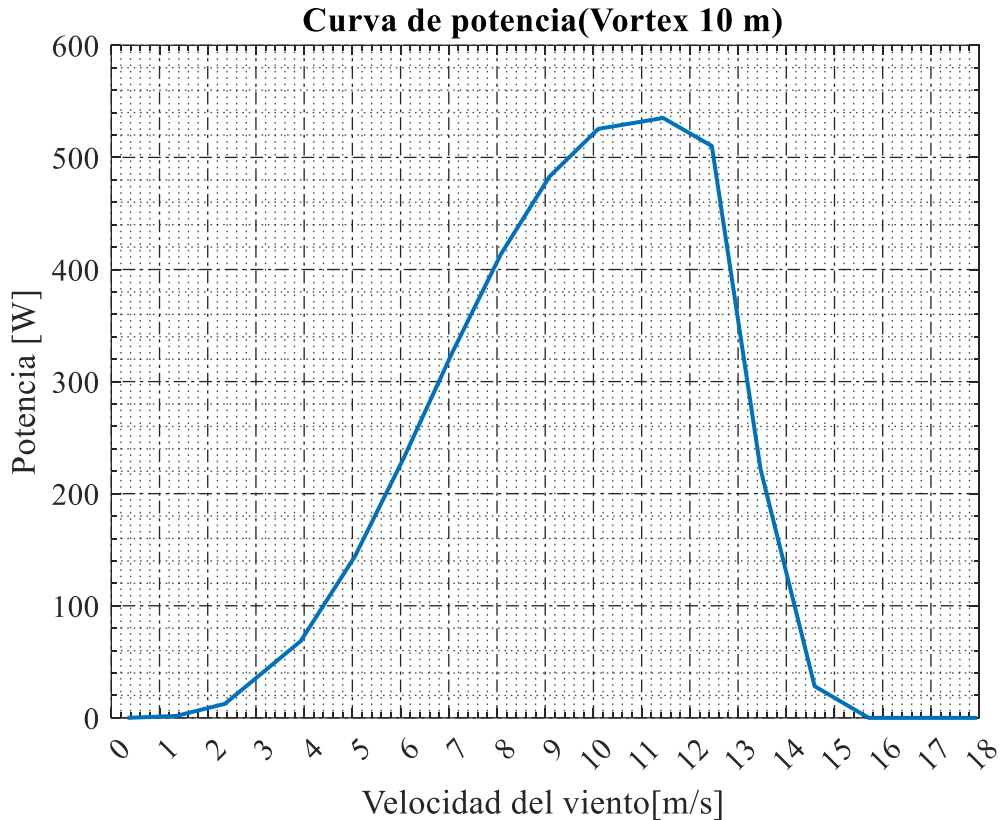


Figura 15 . Curva de potencia para Vortex de 10 m

Fuente: Autor

3.6. Análisis de la turbulencia en campo con aerogeneradores tipo Vortex

Para comprender la turbulencia en los aerogeneradores Vortex de 2,75 m y 10 m, la presente investigación se basó en estudios en sitio proporcionados por el fabricante de la tecnología. Esta decisión se tomó debido a que la turbulencia en estos aerogeneradores difiere considerablemente de la que se presenta en las turbinas eólicas convencionales.

La razón de esta diferencia radica en el principio de generación de energía: las turbinas tradicionales lo hacen por rotación, mientras que los Vortex funcionan por oscilación.

En vista de lo anterior, se tomó como referencia estudios de campo y ensayos de laboratorio realizados por la empresa que desarrolla esta tecnología. Dichos estudios estimaron que la separación entre dispositivos debía ser de alrededor de 0,9 a 1,4 metros para los aerogeneradores de 2,75 metros y entre 3,3 y 5 metros para los de 10 metros de altura respectivamente (Cajas et al., 2018).

Los ensayos realizados por la empresa también indicaron que la influencia entre vórtices de una misma disposición en un campo con separaciones similares a las mencionadas no afectaba negativamente la generación de energía. Por el contrario, se observó que esta disposición favorecía la producción de energía, ya que aumentaba el área de barrido.

3.7. Caracterización de la carga rural

Para dimensionar adecuadamente el sistema eólico destinado a las zonas rurales, fue esencial determinar la demanda energética específica que se pretende abastecer. Basándonos en un estudio reciente realizado por (Missouri Wind, 2024b), en diciembre de 2023, la carga en zonas rurales típicas oscila entre 90-120 kWh al mes, lo que equivale a un consumo diario de aproximadamente 3.5 kWh y una demanda de potencia de 15 kW. Esta información es crucial para asegurar que el sistema eólico diseñado sea capaz de satisfacer estas necesidades energéticas.

La curva característica se detalla en el anexo 8 figura (39) con el comportamiento del consumo rural, esto se asume un consumo actual en el año 2024 siendo un valor máximo, especificación de las coordenadas exactas donde se instalará el Vortex son -2.500998, -78.893509 corresponde a un terreno con una amplia zona verde dentro del área de análisis como punto de conexión estará conectado al alimentador 15299 que conta en el Geovisor público de la CENTROSUR.

3.8. Selección del aerogenerador Vortex

Se llevó a cabo una evaluación para determinar cuál de los Vortex disponibles proporcionaría la potencia necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de una vivienda rural.

Luego de realizar todos los cálculos pertinentes, se estimó la energía para cada Vortex. Los resultados de estos cálculos fueron revisados y modelados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Energía para cada Vortex.

Vortex (m)	Pmax	Densidad nominal (kg/m ³)	Velocidad nominal (m/s)	Cp	Área de barrido (m ²)	Energía kWh mensual
2.75	10 W	0.85	5.62	0.11	0.78	12.94
10	4 kW	0.85	5.62	0.11	10.37	172.10

Fuente: (González, 2019)

3.9. Cálculo de energía total suministrada a la carga

Para realizar el cálculo, se consideraron los siguientes aspectos:

- **Energía demandada por la carga:** Se determinó la cantidad de energía necesaria para alimentar la carga, tomando en cuenta su consumo y el tiempo de operación.
- **Eficiencia del inversor:** Se evaluó la eficiencia del inversor que convierte la energía de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), la cual se utiliza en la mayoría de los hogares y aplicaciones.
- **Pérdidas por caída de tensión:** Se estimó la pérdida de energía que se produce debido a la resistencia de los cables y otros componentes del sistema, la cual se estima en un rango de +/- 5%.
- **Eficiencia del sistema de acumulación de energía:** Se seleccionó un sistema de acumulación de energía con una eficiencia del 95%, lo que significa que conserva el 95% de la energía que se almacena.

El proceso de cálculo se presenta en la ecuación (35), donde se integran los factores mencionados anteriormente para determinar la energía total requerida por el sistema. Asimismo, en la ecuación (36) se presenta la energía mensual.

$$E_{Total} = \frac{E_{carga-diaria}}{n_{inv} * n_{cable} * n_{bat}}$$
$$E_{Total} = \frac{3.5 \text{ kWh}}{0.91 * 0.95 * 0.98} \quad (35)$$

$$E_{Total} = \frac{3.5 \text{ kWh}}{0.84} = 4.16 \text{ kWh}$$

$$E_{mensual} = 4.16 \text{ kWh} * 30 = 125 \text{ kWh} \quad (36)$$

Al comparar los cálculos anteriores con las necesidades energéticas mensuales de una vivienda rural (90-120 kWh), podemos observar que el modelo de 10 metros con una generación de 172.10 kWh mensuales es capaz de satisfacer y superar las necesidades

mencionadas, mientras que el modelo de 2.75 metros genera 12.94 kWh mensuales, lo cual es insuficiente para las necesidades típicas. Esto subraya la importancia de seleccionar un modelo de aerogenerador adecuado basado en la demanda específica de energía de la zona.

Después de realizar un análisis exhaustivo, se determinó que la turbina Vortex de 10 metros es la más idónea para satisfacer las necesidades energéticas de las cargas rurales. Esta decisión se basó en la capacidad de la turbina para generar una cantidad de energía que no solo cumple, sino que supera las demandas típicas de una vivienda rural, como se demostró en los cálculos previos presentados en la Tabla 8, donde se estimó que esta turbina podría generar 172.10 kWh mensuales. Es importante aclarar que la ecuación (36) no fue utilizada directamente para determinar la selección de la turbina, sino para calcular el consumo energético total de una vivienda rural, teniendo en cuenta las pérdidas asociadas a la eficiencia del inversor, el cableado y las baterías. Este cálculo es crucial para entender la demanda energética total, pero la decisión de seleccionar la Vortex de 10 metros se basó principalmente en su capacidad de producción energética, no directamente en la (ecuación (36)). En la tabla 10 se presentan las características técnicas de la turbina elegida

Tabla 10.

Características técnicas de Vortex de 10m

Característica	Especificación
Altura	10 metros
Peso	100 kg
Capacidad de generación	4 kW
Rango de velocidad de viento	3 - 12 m/s
Tipo de generador	Alternador integrado
Corriente de cortocircuito	25.2 A
Costo estimado	\$5,000 USD
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Genera con vientos de baja velocidad - Sigue generando sobre 12 m/s - Menos mantenimiento
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia ligeramente menor que aspas tradicionales - Residencial
Aplicaciones ideales	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeños negocios - Telecomunicaciones - Agricultura

Fuente: (Nguyen et al., 2022)

3.10. Cálculo del inversor

El criterio para la selección del inversor se basó en la potencia máxima demandada, la cual se aplicó mediante la ecuación (37).

$$P_{inv} = \frac{P_{maxd}}{n_{inv}} = \frac{1500 W}{0.91} = 1.65 kw \quad (37)$$

Por lo tanto, se seleccionó el inversor Trucks RV de 2500 W de 24 V. En el anexo 2 se adjunta hoja característica. En la Tabla 11 se detallan las características del inversor elegido.

Tabla 11.

Características del inversor elegido

Característica	Descripción
Potencia del inversor	2500 vatios
Entrada	24V
Salida	110V / 120V
Aplicación	Sistemas eólicos
Pantalla LCD	Sí

Fuente: (Missouri Wind, 2024a)

3.11. Cálculo del banco de baterías

Para el cálculo del sistema de almacenamiento se consideraron diversos factores, entre ellos: la energía total, la capacidad del banco de baterías, los días de autonomía, la profundidad de descarga, el margen de seguridad por temperatura y la tensión del banco de baterías. El cálculo se realizó mediante la ecuación (38).

$$Q = \frac{(100 + Ms) * E_{tot} * D_{auto}}{T_{bat} * P_{descarga}} \quad (38)$$

$$Q = \frac{(100 + 15)\% * 4.16 kWh * 1}{24 * 50\%} = 399.30 Ah$$

De igual manera, se calculó el número de baterías en serie y paralelo. Para ello, se trabajó con baterías de 200 A-h de capacidad y 24 V. El cálculo se realizó mediante la ecuación (39).

$$N_{bat_{ser}} = \frac{Tensión\ del\ banco\ de\ baterías}{T\ de\ bat\ seleccionada} = \frac{24}{12} = 2 \quad (39)$$

Por otro lado, el número de baterías en paralelo se calculó mediante la ecuación (40).

$$N_{bat_{par}} = \frac{Capacidad\ del\ banco\ de\ baterías}{Capacidad\ de\ bat\ seleccionada} = \frac{399.30 Ah}{200 Ah} = 1.99 \quad (40)$$

En última instancia, el número total de baterías se determinó a través de la ecuación (41).

$$N_{Total} = N_{bat_{ser}} * N_{bat_{par}} = 2 * 1.99 = 3.98 \approx 4 \quad (41)$$

Por lo tanto, se considerarán cuatro baterías de 24 voltios y 200 amperios hora conectadas en serie en pares. En la tabla 12 se detalla los parámetros técnicos de la batería seleccionada.

Tabla 12.

Características de las baterías seleccionadas

Característica	Descripción
Marca	QP
Modelo	200Ah
Voltaje de la batería	24V
Tecnología de la batería	Gel
Capacidad de la batería	200 Ah
Largo	53 cm
Altura	24.8 cm
Ancho	26.5 cm
Peso	42 kg

Fuente: (MercadoLibre, 2024)

3.12. Cálculo de regulador de carga

Para dimensionar este dispositivo se empleó la corriente de cortocircuito junto con el número de turbinas y el factor de seguridad que se establece en 1.25. Es así como, el cálculo se realizó mediante la ecuación 42.

$$R_{carga} = I_{sc} * \text{turbinas} * 1.25 = 25.5 A * 1 * 1.25 = 31.87 A \quad (42)$$

En base a lo anterior, se seleccionó un regulador de carga Victron Energy de 70 A, 24 V en el lado de CC y 2000 W en el lado de CA. En la tabla 13 se detallan las características técnicas del regulador de carga seleccionado.

Tabla 13.

Características de regulador de carga seleccionado.

Característica	Descripción
Modelo	Smart 150/60 y 150/70
Tensión de la batería	Ajuste automático a 12, 24 ó 48 V (Se precisa una herramienta de software para ajustar a 36 V)
Corriente de carga nominal	60 A y 70 A
Potencia eólica nominal, 12 V	860 W y 1000 W
Potencia eólica nominal, 24 V	1720 W y 2000 W
Potencia eólica nominal, 36 V	2580 W y 3000 W
Potencia eólica nominal, 48 V	3440 W y 4000 W
Máxima corriente de corto circuito eólico	50 A (máx. 30 A por conector MC4)
Tensión máxima del circuito abierto eólico	150 V máximo absoluto en las condiciones más frías, 145 V en arranque y funcionando al máximo
Eficacia máxima	98 %
Autoconsumo	Menos de 35 mA a 12 V / 20 mA a 48 V

Fuente: (Victron Energy, 2024)

3.13. Instalación del Vortex

El aerogenerador sin aspas se instalará siguiendo las recomendaciones del fabricante. Estas indican que se debe instalar sobre una estructura de concreto de 1 metro cúbico con sus respectivas varillas de anclaje donde se fijará el mástil. La estructura se construirá en la mitad de un espacio de 4 metros cuadrados (BirdLife, 2015).

A modo de ejemplo, las coordenadas exactas donde se instalará el Vortex son -2.500998, -78.893509. Este sitio corresponde a un terreno con una amplia zona verde dentro del área de análisis.

3.14. Funcionamiento del sistema eólico diseñado

El sistema de generación eólica diseñado funciona de la siguiente manera (ver Figura 16). A lo largo del día, la turbina eólica sin aspas se realiza un análisis, también

conocida como Vortex, genera electricidad en función de la velocidad del viento. Esta electricidad llega al medidor o contador de energía, que registra la cantidad de energía producida. El contador también tiene la capacidad de recibir energía de la red eléctrica y proporcionar energía al controlador de carga.

Después de pasar por el contador, la energía llega al controlador de carga. Este se encarga de alimentar al inversor y de proporcionar la energía necesaria para cargar la batería. El inversor, por su parte, transforma la energía de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) para que pueda ser utilizada por las cargas de la vivienda rural. El flujo de energía antes descrito se resume en los siguientes pasos:

1. **Turbina eólica:** Genera electricidad a partir del viento.
2. **Medidor de energía:** Registra la cantidad de energía producida, permite la recepción de energía de la red y provee de energía al controlador de carga.
3. **Controlador de carga:** Distribuye la energía al inversor y a la batería.
4. **Batería:** Almacena la energía sobrante para su uso posterior.
5. **Inversor:** Transforma la energía de CC a CA para que pueda ser utilizada por las cargas.
6. **Cargas:** Consumen la energía eléctrica para el funcionamiento de la vivienda rural.

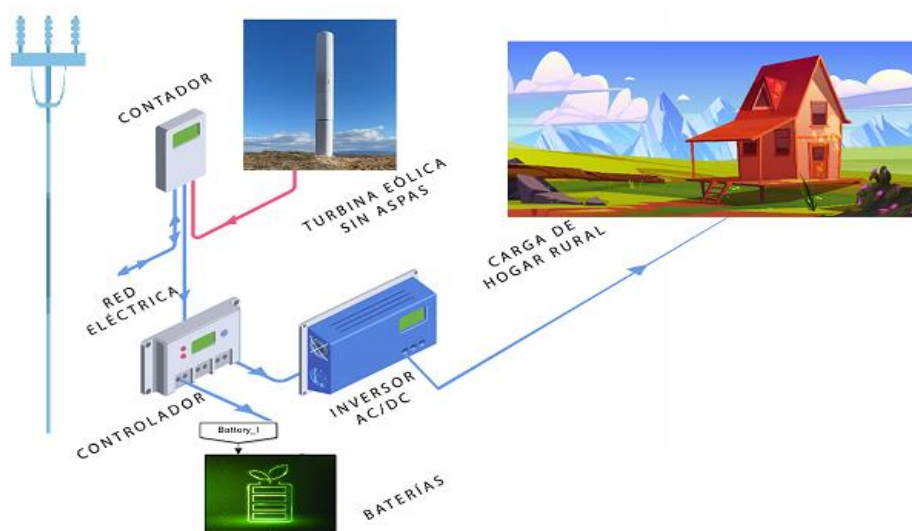


Figura 16 Diagrama completo del sistema de generación eólico sin aspas

Fuente: (Ansari, 2021).

CAPÍTULO IV.

4. Simulación del sistema eólico mediante software Matlab Simulink.

En esta sección se presentó la simulación en Simulink del sistema de generación eólica tipo Vortex diseñado en la sección anterior. La modelación del generador sin aspas, el moldeamiento del sistema de almacenamiento, la carga de la vivienda rural y el análisis de las formas de onda del sistema eólico modelado fueron desarrollados con éxito.

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se llevaron a cabo diferentes análisis del sistema en dos casos principales. En primer lugar, se enfocó en el diseño para una única vivienda, y luego se centró en el diseño para las 35 viviendas que forman parte de la comunidad Marcopamba de Cañar. A continuación, se detallará cada uno de los sistemas que se simularon y se analizará la modelación de cada componente, así como las formas de onda resultantes de la simulación.

4.1.1. Detalle del sistema para una vivienda

Basándose en el diagrama de la Figura 17, se ha procedido a implementar en Matlab Simulink el diseño eléctrico del sistema eólico y de almacenamiento con el objetivo de satisfacer la demanda eléctrica de una vivienda rural. Es importante destacar que tanto el sistema eólico como el sistema de almacenamiento generan corriente continua. En el proceso de simulación, se ha considerado que estas fuentes de energía ya han sido convertidas a corriente alterna para asegurar el suministro eléctrico, tal como se detalla en el Anexo 1. Este enfoque garantiza la compatibilidad y eficacia del sistema con los requisitos de consumo eléctrico de la vivienda en mención.

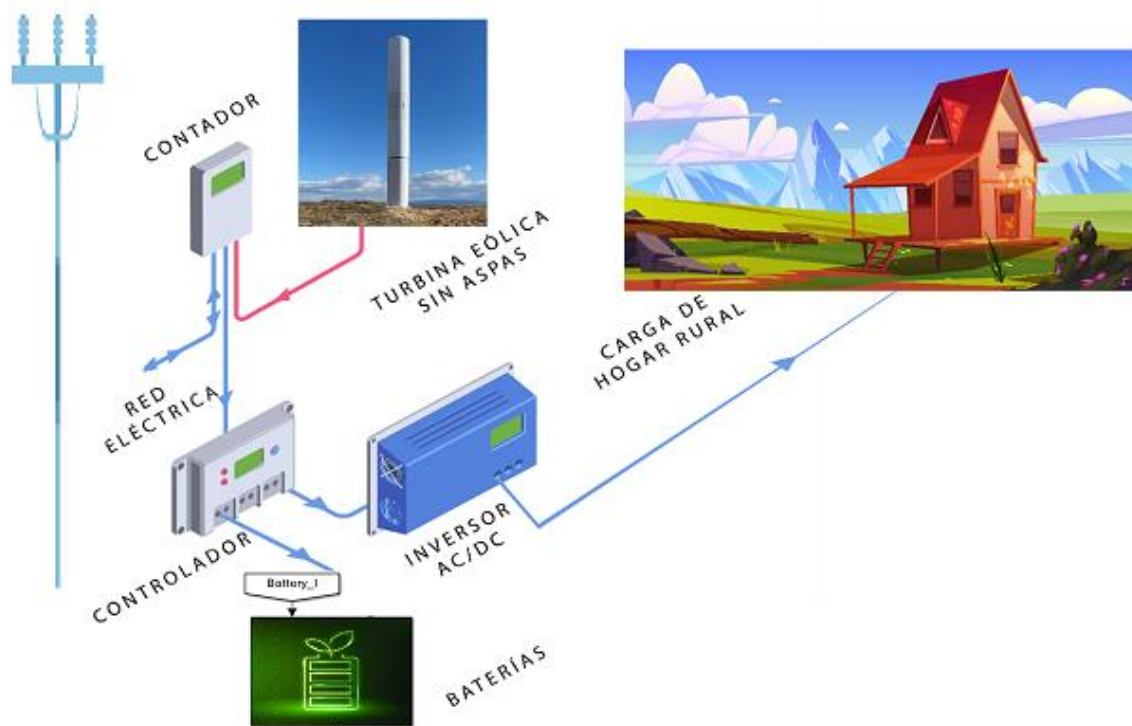
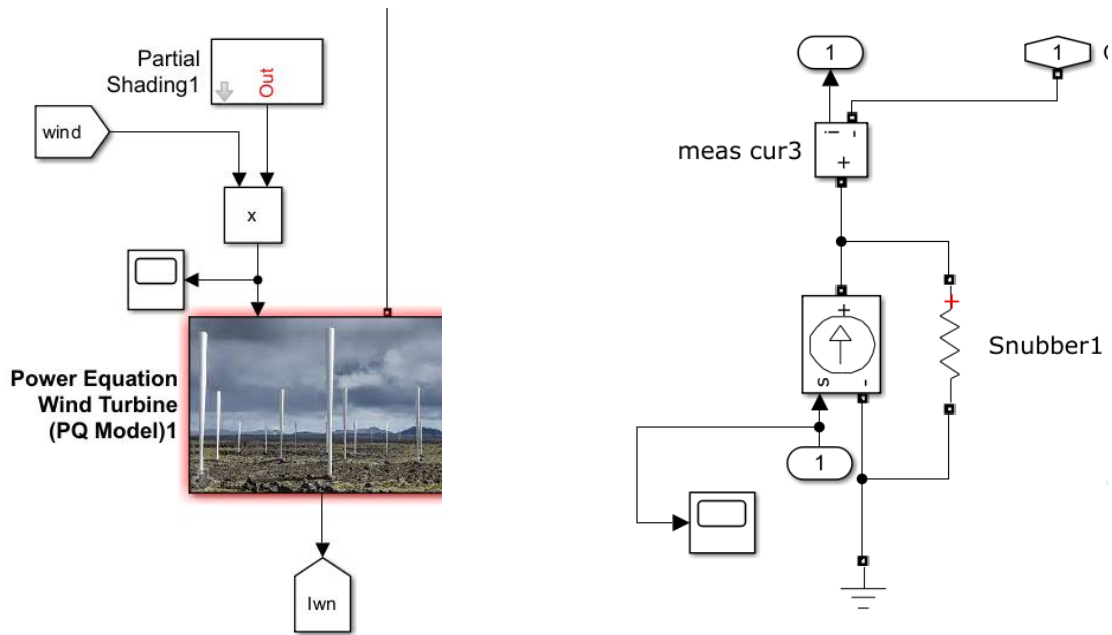


Figura 17. Red de estudio propuesta.

Fuente: (Ansari, 2021)

4.1.2. Modelación de generación eólica sin aspas

La Figura 18 (a) proporciona una representación esquemática detallada del sistema de generación eólica sin aspas, fundamentada en la potencia derivada de la velocidad del viento, la densidad del aire, el área de barrido y la eficiencia del rotor. Complementariamente, la Figura 18 (b) presenta de manera gráfica la fuente de corriente proveniente del sistema eólico. Estos diagramas fortalecen la conceptualización de los sistemas eólicos como generadores de energía renovable, capaces de convertir la energía cinética del viento en electricidad.



(a) Sistema eólico sin aspas

(b) Modelación mediante fuente de corriente

Figura 18. Generación eólica sin aspas

Fuente: Autor

4.1.3. Modelación del sistema de almacenamiento

El apartado de la Figura 19 (a) expone un diagrama global del sistema de almacenamiento de energía, usualmente conformado por acumuladores recargables. Para examinar minuciosamente el desempeño de este tipo de arreglos, se debe considerar tanto la forma en que se guarda la energía como la manera en que fluye entre sus componentes.

La imagen complementaria de la Figura 19 (b) ayuda a conceptualizar la naturaleza de la energía almacenada, presentándola como una fuente ideal de corriente constante. Este modelo abstracto simplifica la interpretación de propiedades importantes, tales como la tensión máxima admisible, la capacidad de almacenamiento disponible y la impedancia inherente del sistema.

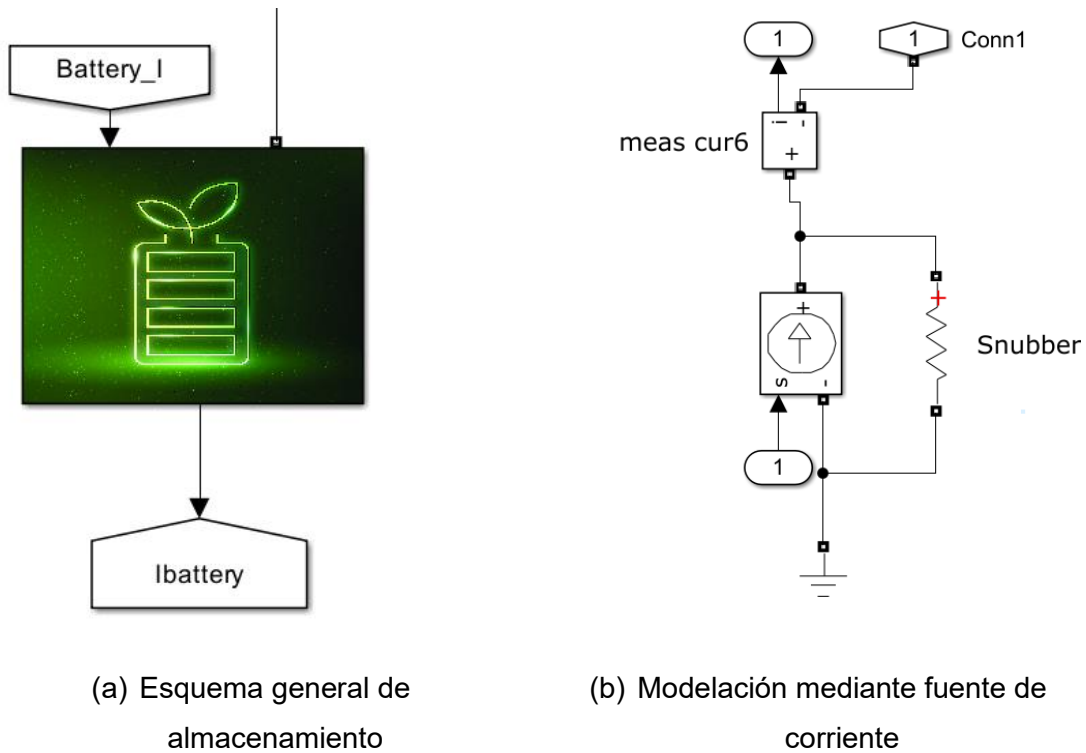


Figura 19. Sistema de reserva de energía

Fuente: Autor

Dentro de un sistema de generación eólica sin aspas descentralizado, el conjunto de baterías asume una función primordial a la hora de regular el flujo de energía eléctrica hacia la vivienda ubicada en zonas rurales y aisladas. Como se ilustró en la Figura 19(a), la batería actúa como proveedora neta de energía cuando las condiciones meteorológicas adversas limitan la producción de energía eólica sin aspas, mientras que, en situaciones favorables, capta el sobrante de energía generada para mantenerla en reserva.

Este dinámico intercambio de potencia se lleva a cabo bajo el control de un regulador inteligente, que supervisa constantemente el valor de la corriente circulante y modula la transferencia de energía en consecuencia, con el objetivo de garantizar un balance neto nulo de potencia activa en el punto de conexión a la red, como se infiere de la información incluida en la Figura 20.

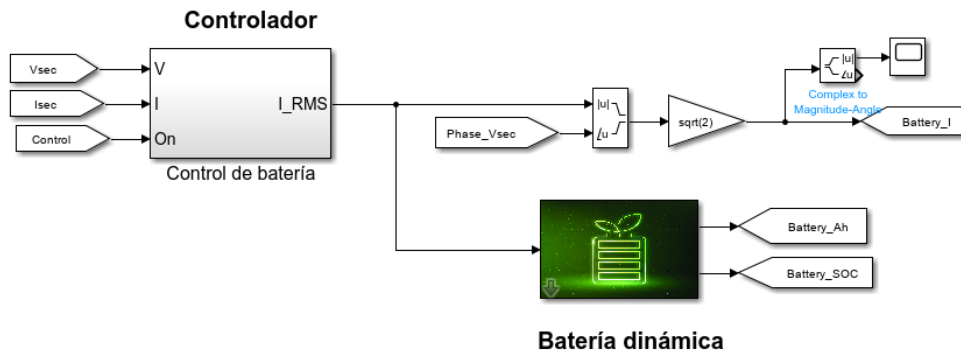


Figura 20. Controlador de sistema de almacenamiento

Fuente: Autor

4.1.4. Carga de vivienda rural

Utilizando una fuente de corriente ideal (Figura 21), se sintetiza el patrón de consumo previamente identificado. Esta abstracción simplifica el análisis de las interacciones entre la carga y el sistema de generación.



(a) Esquema general de la carga

(b) Modelación mediante fuente de corriente

Figura 21. Modelación de carga rural

Fuente: Autor

Dado que las condiciones de funcionamiento ideales raramente coinciden con las realidades del mundo real, el modelo incorpora un trip signal, un dispositivo de protección que interrumpe el suministro eléctrico cuando se sobrepasan los límites predefinidos de intensidad o tensión. Su propósito es simular una pérdida de energía en

un instante preciso, permitiendo así la evaluación de la capacidad de recuperación del sistema y la medición de su desempeño frente a situaciones adversas.

4.1.5. Análisis de formas de ondas del sistema eólico sin aspas

Durante el proceso de análisis y evaluación del sistema de generación eólica sin aspas, resulta imprescindible examinar detalladamente varios diagramas y curvas de desempeño. Estos revelan información valiosa sobre el comportamiento y la eficiencia del sistema. Entre los gráficos de interés, merece especial atención el perfil eólico empleado en la simulación, junto con la curva de potencia de despacho del generador eólico. Del mismo modo, la curva de demanda prevista para el escenario de análisis y la curva de oferta generada por el sistema de almacenamiento.

4.1.6. Resultados de generación eólica

Se utilizó el Script Matlab para cargar los datos de velocidad del viento. Estos datos se añadieron cada 60 segundos hasta completar un día entero de 24 horas. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de obtener una representación más precisa de los datos, como se observa en la Figura 22.

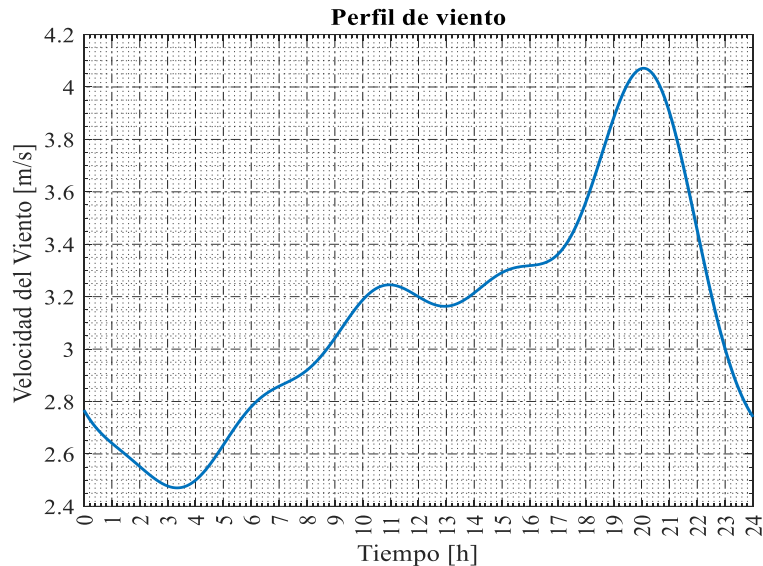


Figura 22. Perfil del viento para sistema eólico

Fuente: Autor

Tras el análisis, se logra determinar la potencia del aerogenerador, el cual está compuesto por 1 aerogenerador sin aspas. Esta evaluación revela que la potencia máxima alcanzada por este sistema es de 505.46 W, como se evidencia en la Figura

23. Al calcular la integral de la señal de potencia ofertada en el lapso de 24 horas, se obtuvo 4.13 kWh día.

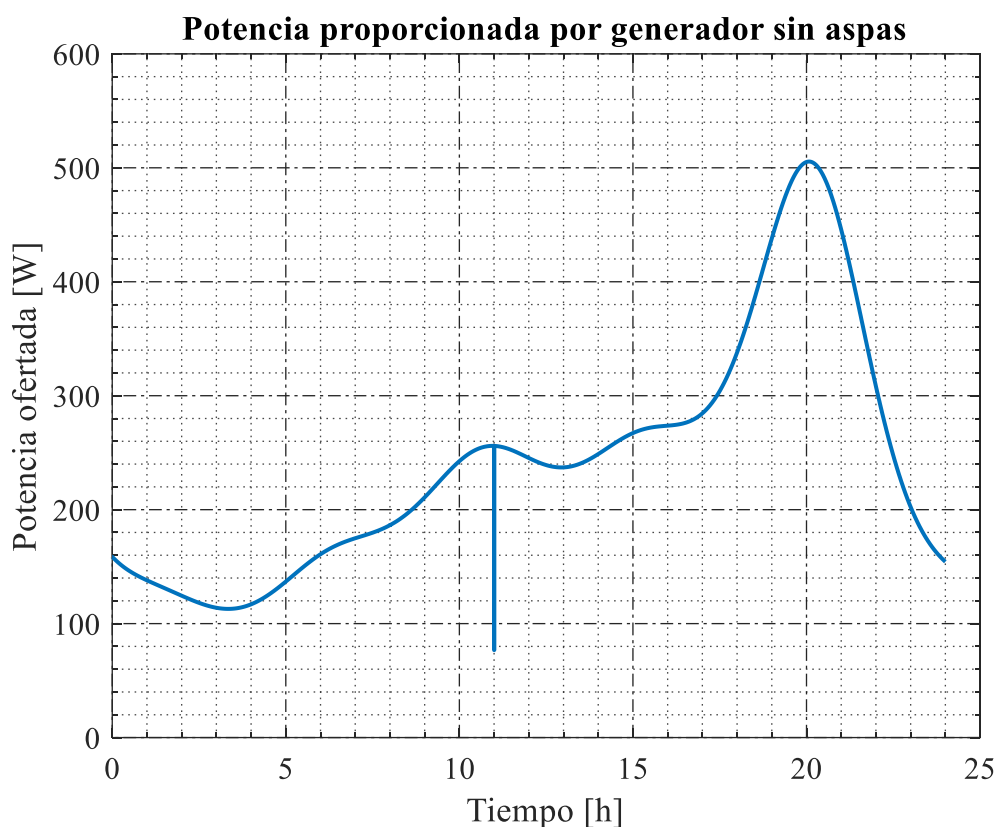


Figura 23. Potencia generada por generador eólico sin aspas

Fuente: Autor

Tras examinar de forma detallada el comportamiento de la producción de potencia del aerogenerador sin aspas, se ha constatado que, en caso de que exista ausencia de viento, la potencia generada disminuye significativamente. Esta conclusión queda perfectamente representada en la Figura 23, donde se ilustra cómo una interrupción temporal en el suministro de energía eólica puede impactar negativamente en el rendimiento general del sistema.

Para ejemplificar esta situación, se tomó como referencia un lapso específico: las 11:00 a. m., durante un lapso de 20 segundos (Figura 24). Durante veinte segundos, se simuló una falta de alimentación proveniente del viento, lo que inevitablemente provocó una merma notable en la captación y transformación de energía. Los efectos adversos derivados de esta anomalía quedaron plasmados en la gráfica mencionada, subrayando la importancia vital de mantener operativo y sin contratiempos el sistema aerogenerador para maximizar su eficiencia y productividad.

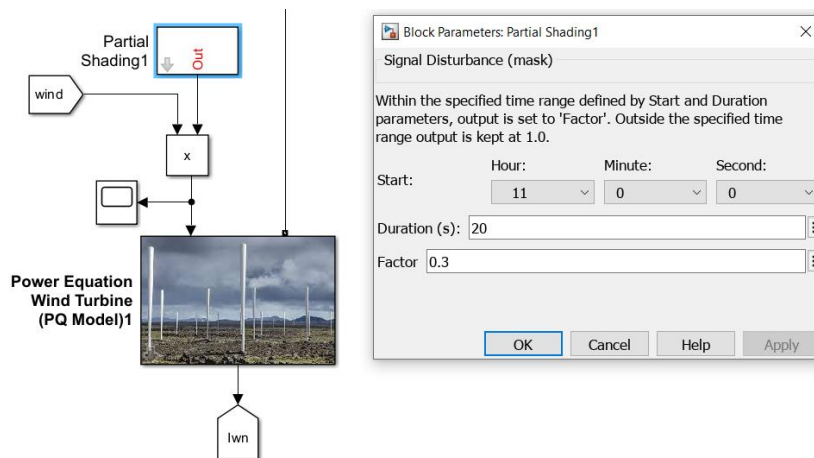


Figura 24 Falta generada en sistema de generación eólica sin aspas

Fuente: Autor

4.1.7. Resultados de carga eléctrica rural

El perfil de la carga eléctrica total del usuario rural resulta en una potencia máxima de 642.78 W, alcanzada aproximadamente a las 7:35 pm. Asimismo, la energía consumida por la carga en un lapso de 24 horas es de 3.50 kWh (ver Figura 25).

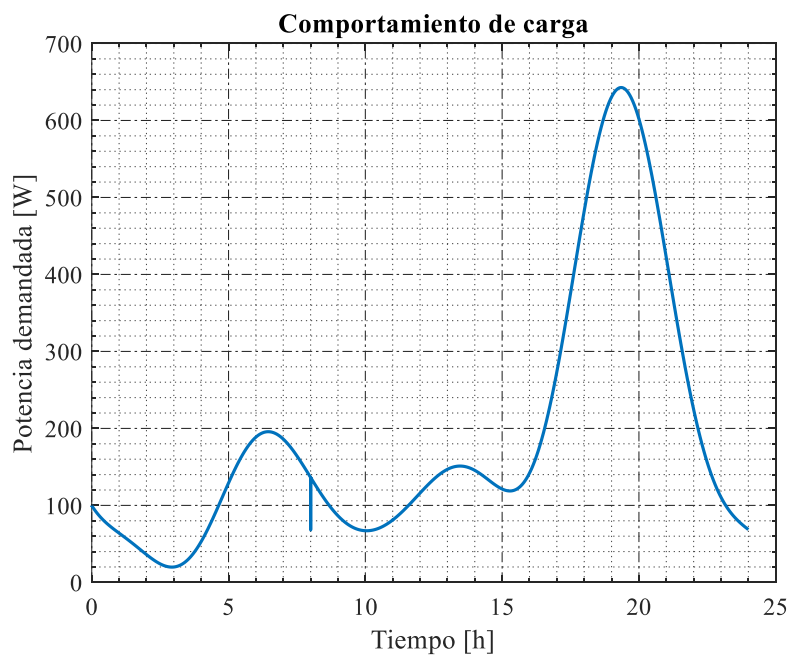


Figura 25. Comportamiento de carga eléctrica rural en simulación

Fuente: Autor

4.1.8. Resultados de sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento se analiza en cuanto a su comportamiento durante 24 horas, el cual tiene la capacidad de almacenar o entregar energía según sea necesario y de acuerdo con los requerimientos del generador eólico.

El análisis del sistema revela que la batería almacena energía durante la mañana y la tarde. Sin embargo, por la noche, la batería entrega energía a la vivienda, lo cual es lógico debido a la menor velocidad del viento en ese momento. Los valores negativos en la Figura 26 indican que la batería se está cargando en mayor o menor medida, y se observa que la carga completa se logra a las 10:00 AM.

En términos de energía, se observa que la batería consume 0.44 kWh al día. Por otro lado, a las 7:35 PM, la batería proporciona 506.7 Wh, lo que significa que contribuye al abastecimiento de la carga de la vivienda rural.

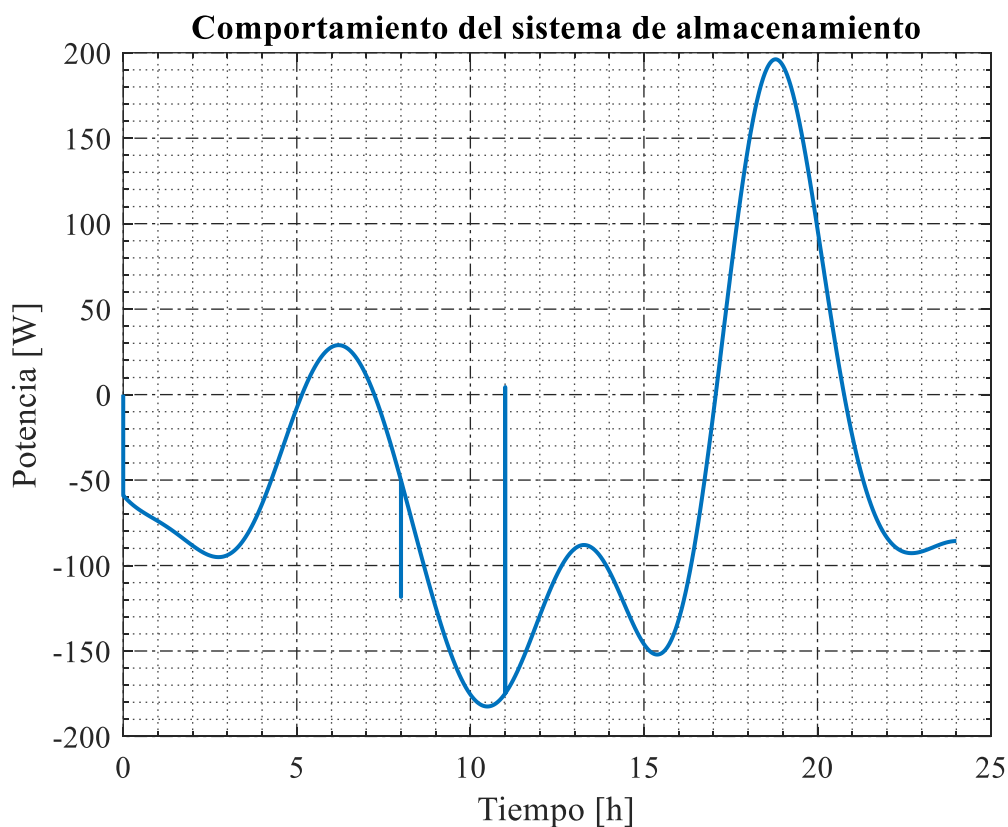


Figura 26. Comportamiento del sistema de almacenamiento

Fuente: Autor

4.1.9. Balance de energía para una vivienda

El balance se refiere al análisis netamente de la energía que ofrecieron y consumieron cada uno de los elementos del sistema durante un lapso de 24 horas, para

ello se detalla la energía de la carga, generación y sistema de almacenamiento (ver Tabla 14).

Tabla 14.

Balance de carga para una vivienda.

Variable	Energía (kWh) - día
Generación	4.1395
Carga rural	3.5027
Baterías	-0.4468
Total, de energía	0.19

Fuente: Autor

Del balance de potencia realizado se constata que el generador eólico sin aspas abastece de manera total a la carga rural y al sistema de almacenamiento con el perfil del viento de la zona de estudio.

4.2. Análisis de formas de ondas del sistema eólico sin aspas para 35 viviendas

El análisis para las 35 viviendas se basa en el consumo diario conocido para el área rural, que es de 3.5027 kWh. Para obtener el consumo total, se multiplica este valor por el número de viviendas, lo que da como resultado un consumo diario de 122.5945 kWh. Esto significa que se requiere una producción diaria de 122.5 kWh.

Al proyectar el consumo diario al mes, se obtiene una necesidad total de 3677.83 kWh. Considerando que la turbina sin aspas de 10 metros puede producir un máximo de 172.10 kWh al mes, se necesitan un total de 21 generadores sin aspas para abastecer a las 35 viviendas.

4.2.1. Resultados de generación eólica

Se utilizó el Script Matlab para cargar los datos de velocidad del viento. Estos datos se añadieron cada 60 segundos hasta completar un día entero de 24 horas. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de obtener una representación más precisa de los datos, como se observa en la Figura 27.

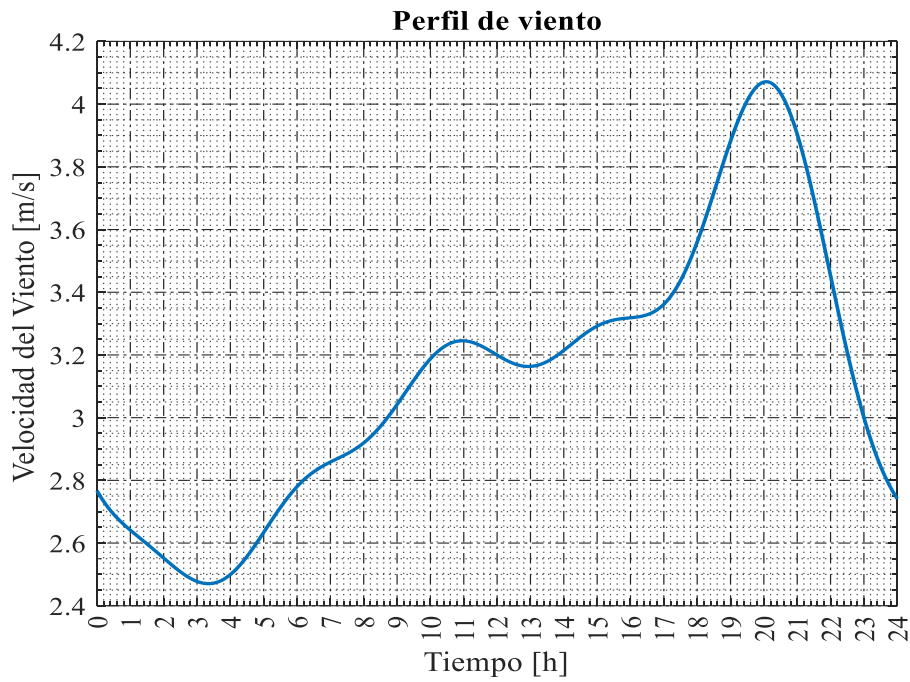


Figura 27. Perfil del viento para sistema eólico

Fuente: Autor

Tras el análisis, se logra determinar la potencia del sistema eólico, el cual está compuesto por 21 aerogenerador sin aspas. Esta evaluación revela que la potencia máxima alcanzada por este sistema es de 17.69 kW, como se evidencia en la Figura 28. Al calcular la integral de la señal de potencia ofertada en el lapso de 24 horas, se obtuvo 144.16 kWh.

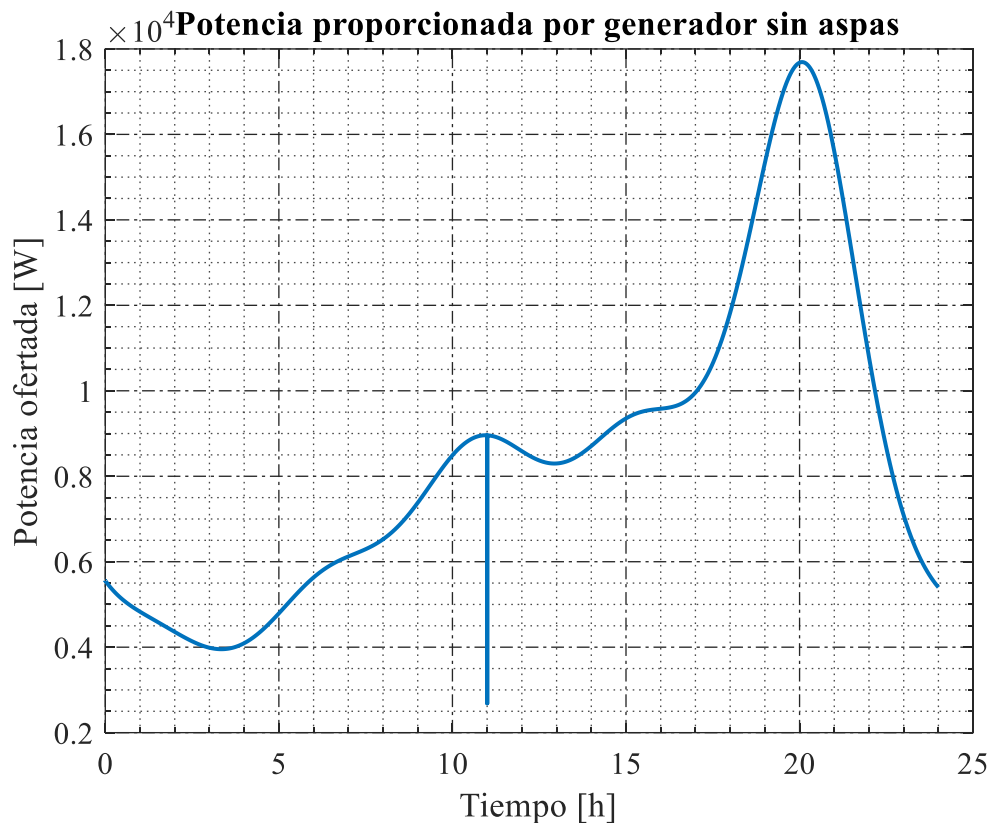


Figura 28. Potencia generada por generador eólico sin aspas – 35 viviendas

Fuente: Autor

Tras examinar de forma detallada el comportamiento de la producción de potencia del aerogenerador sin aspas, se ha constatado que, en caso de que exista ausencia de viento, la potencia generada disminuye significativamente. Esta conclusión queda perfectamente representada en la Figura 28, donde se ilustra cómo una interrupción temporal en el suministro de energía eólica puede impactar negativamente en el rendimiento general del sistema.

Para ejemplificar esta situación, se tomó como referencia un lapso específico: las 11:00 a. m., durante un lapso de 20 segundos (Figura 29). Durante veinte segundos, se simuló una falta de alimentación proveniente del viento, lo que inevitablemente provocó una merma notable en la captación y transformación de energía. Los efectos adversos derivados de esta anomalía quedaron plasmados en la gráfica mencionada, subrayando la importancia vital de mantener operativo y sin contratiempos el sistema aerogenerador para maximizar su eficiencia y productividad.

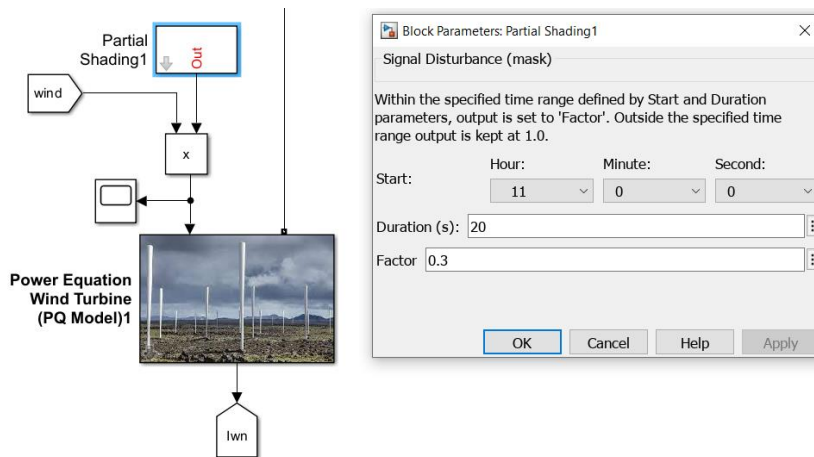


Figura 29. Falla generada en sistema de generación eólica sin aspas – 35 viviendas

Fuente: Autor

4.2.2. Resultados de carga eléctrica rural

El perfil de la carga eléctrica total del usuario rural resulta en una potencia máxima de 22.49 kW, alcanzada aproximadamente a las 7:35 pm. Asimismo, la energía consumida por la carga en un lapso de 24 horas es de 121.42 kWh (ver Figura 30).

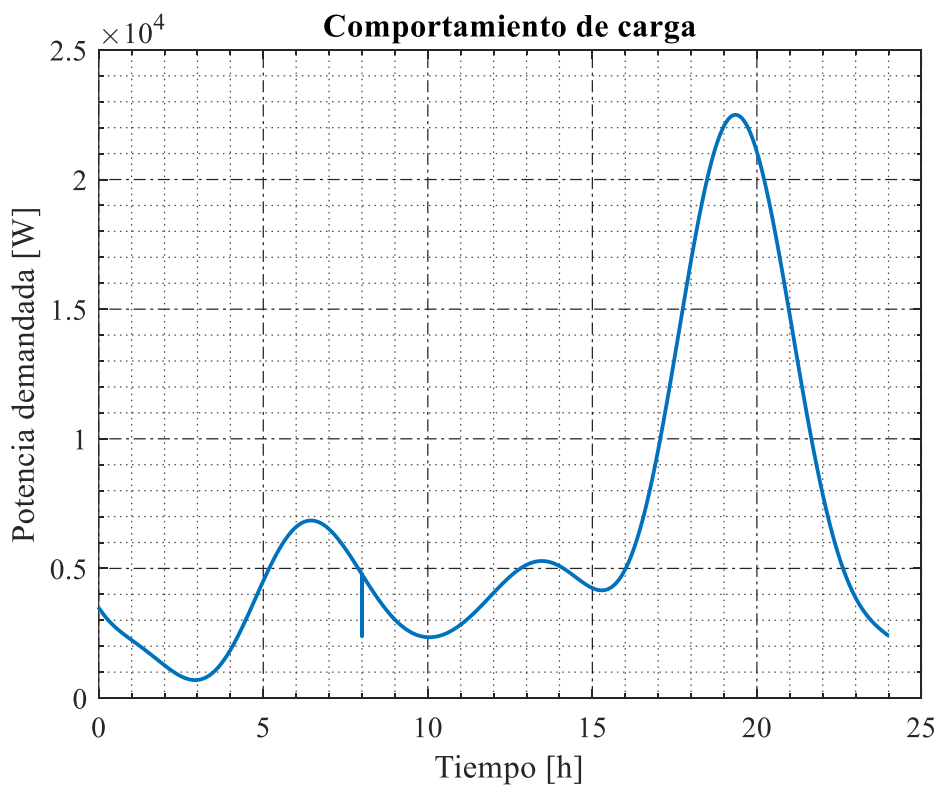


Figura 30. Comportamiento de carga eléctrica rural en simulación – 35 viviendas

Fuente: Autor

4.2.3. Resultados de sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento se analiza en cuanto a su comportamiento durante 24 horas, el cual tiene la capacidad de almacenar o entregar energía según sea necesario y de acuerdo con los requerimientos del generador eólico.

El análisis del sistema revela que la batería almacena energía durante la mañana y la tarde. Sin embargo, por la noche, la batería entrega energía a la vivienda, lo cual es lógico debido a la menor velocidad del viento en ese momento. Los valores negativos en la Figura 31 indican que la batería se está cargando en mayor o menor medida, y se observa que la carga completa se logra a las 10:00 AM.

En términos de energía, se constata que la batería consume 13.98 kWh al día. Por otro lado, a las 7:35 PM, la batería proporciona 17.02 kWh, lo que significa que contribuye al abastecimiento de la carga de la vivienda rural.

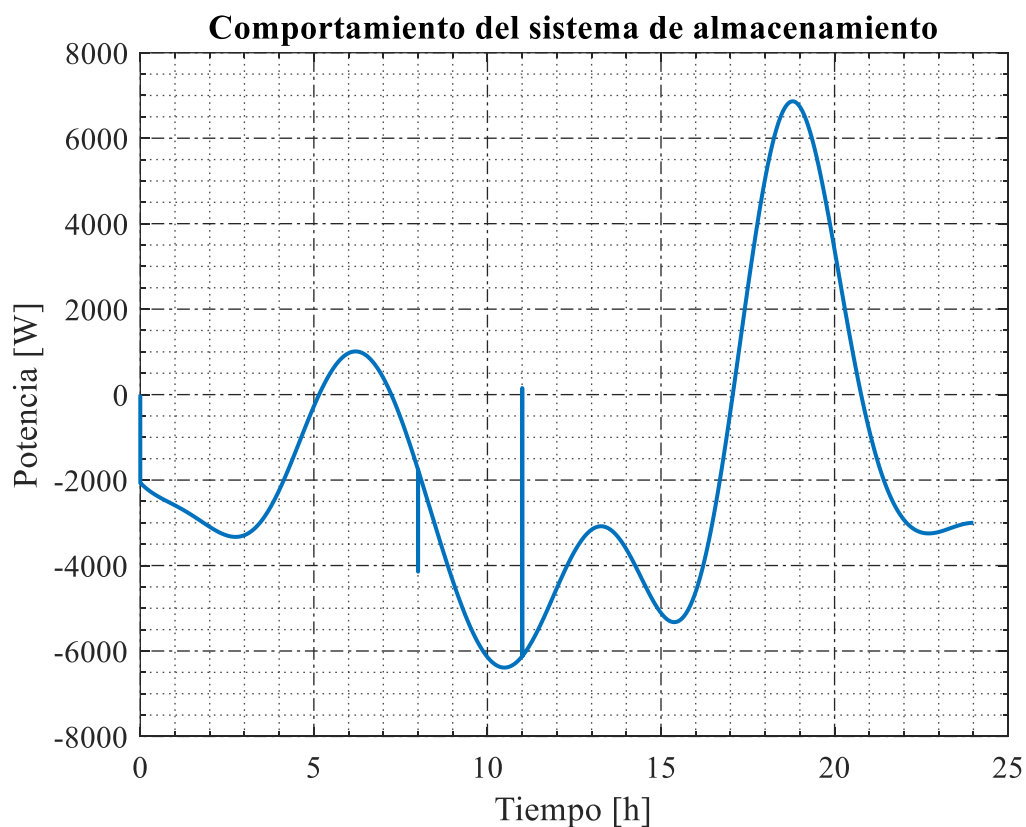


Figura 31. Comportamiento del sistema de almacenamiento – 35 viviendas

Fuente: Autor

4.2.4. Balance de energía para 35 viviendas

El balance se refiere al análisis netamente de la energía que ofrecieron y consumieron cada uno de los elementos del sistema durante un lapso de 24 horas, para

ello se detalla la energía de la carga, generación y sistema de almacenamiento (ver Tabla 15).

Tabla 15.

Balance de carga para 35 viviendas

Variable	Energía (kWh) - día
Generación	144.1624
Carga rural	121.4249
Baterías	-13.9853
Total, de energía	8.75

Fuente: Autor

Del balance de potencia realizado se constata que el generador eólico sin aspas abastece de manera total a la carga rural y al sistema de almacenamiento con el perfil del viento de la zona de estudio.

4.2.5. Inversión

Cuando se trata de calcular la inversión necesaria para poner en marcha el sistema eólico sin aspas presentado, hay varios gastos que se deben tomar en cuenta. Además de los costos directos de los materiales, también es necesario considerar los gastos indirectos asociados a la mano de obra y la administración (Tabla 16). Solo de esta manera se puede obtener una estimación precisa y realista de la inversión requerida.

Tabla 16.

Inversión inicial.

#	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Aerogenerador sin aspas	1	\$5.000,00	\$5.000,00
2	Baterías	1	\$15.000,00	\$15.000,00
3	Regulador	1	\$1.300,00	\$1.300,00
4	Inversor	1	\$10.000,00	\$10.000,00
5	Accesorios	1	\$1.000,00	\$1.000,00
6	Mano de Obra	1	\$1.000,00	\$1.000,00
7	Administración	1	\$4.460,00	\$4.460,00
			TOTAL	\$37.760,00

Fuente: Autor

4.2.6. Ingresos y egresos

Como se aprecia en la Tabla 17, se encuentran los ingresos correspondientes a un hogar rural, donde se destaca el sueldo laboral como la fuente primaria de dichos ingresos. Es evidente que los salarios constituyen una parte fundamental en la determinación de los montos percibidos por los ocupantes de la casa rural. En este sentido, se asume que el hogar al menos gana un sueldo básico.

Tabla 17.

Inversión inicial

Criterio	Valor
Sueldo básico	\$500,00
Ingresos anuales	\$6.000,00

Fuente: Autor

En la Tabla 18 se determina los egresos anuales, donde se utiliza \$0,09 como el costo del consumo de energía eléctrica por kilovatio hora. Además, se emplea el consumo diario, que es la integral de la curva de carga típica rural, de 3.5 kWh.

Tabla 18.

Egresos mensuales

Criterio	Unitario	Valor Total
Consumo eléctrico mensual	105 kWh	\$9,45
Egresos mensuales	\$100,00	\$100,00
Total, de egresos mensuales		\$109,45

Fuente: Autor

4.2.7. Análisis costo - beneficio

Antes de realizar este análisis, es necesario calcular el período de recuperación de la inversión. Este cálculo permite determinar la cantidad de flujos netos de efectivo necesarios para recuperar la inversión inicial.

Para llevar a cabo este cálculo, se divide la inversión requerida entre el dividendo anual destinado al proyecto. El resultado obtenido corresponderá al número de períodos necesarios para recuperar la inversión, que en este caso es de 6. Posteriormente, en el período cero se registra el valor de inversión, mientras que a partir del primer período se incorpora el dividendo anual estimado.

Una vez determinado el período de recuperación de la inversión, se procede a calcular el flujo de efectivo acumulado. Dicho cálculo permite evaluar la conveniencia de realizar una inversión a través del tiempo, considerando los flujos de efectivo entrantes y salientes.

Tabla 19.

Flujo neto acumulado

Periodo	Flujo de efectivo	Flujo neto acumulado
0	-27760	
1	4699,56	-23060,44
2	4699,56	-18360,88
3	4699,56	-13661,32
4	4699,56	-8961,76
5	4699,56	-4262,2
6	4699,56	437,36
7	4699,56	5136,92
8	4699,56	9836,48
9	4699,56	14536,04
10	4699,56	19235,6

Fuente: Autor

En la Tabla 19 se encuentra la información relacionada con el período de recuperación de la inversión, el cual se sitúa en el sexto período. Esta situación indica que a partir de dicho período se empezarán a obtener los beneficios de la inversión realizada.

No obstante, es importante tener en cuenta que el flujo acumulado no considera el valor del dinero en el tiempo, por lo que se hace necesario recurrir a herramientas que sí contemplan esta variable. Concretamente, en este caso se han utilizado el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), cuyos resultados se presentan en la Tabla 16 y se basan en una vida útil del sistema eólico de 10 años.

Tabla 20.

Indicadores de viabilidad de inversión

TIR Anual	11,49%
-----------	---------------

VAN	\$28.876,76
-----	--------------------

Fuente: Autor

Según los resultados presentados en la Tabla 20, el Valor Actual Neto (VAN) es positivo y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es superior al 8%, lo que demuestra la viabilidad financiera del proyecto de instalación de sistemas eólicos sin aspas.

Estos resultados satisfacen los estándares de rentabilidad establecidos por el Banco Central del Ecuador (Quisaguano, 2019), lo que respalda la solidez del proyecto y su capacidad para generar rendimientos favorables.

CONCLUSIONES

El análisis del recurso eólico revela que la velocidad media anual del viento es de 5.40 m/s a la altura del buje especificada, teniendo en cuenta una densidad de aire corregida de 0.94 kg/m^3 debido a la altitud del sitio, que es de 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm). La distribución de probabilidades de Weibull, caracterizada por un factor de forma (k) de 1.7371 y un parámetro de escala (c) de 6.3154 m/s, representa de manera adecuada el comportamiento del viento en el área de estudio, estos datos permiten estimar una potencia media disponible de 187.58 W/m² y un factor de capacidad del 35.5% además estos resultados son fundamentales para el diseño y la planificación del proyecto eólico, ya que proporcionan información crucial sobre la disponibilidad y el comportamiento del recurso eólico en el área. Con estas referencias técnicas, se pueden tomar decisiones informadas sobre el dimensionamiento y la ubicación de los aerogeneradores para maximizar la eficiencia y la producción de energía del sistema.

Considerando la baja a moderada intensidad del viento, con el 79% de las mediciones por debajo de 7 m/s, se opta por implementar un aerogenerador sin aspas de 13 m de altura y 4 kW de capacidad nominal. Su rango operativo de 3 a 12 m/s y capacidad de generación lo posicionan como la alternativa más adecuada frente a los patrones de viento identificados.

El análisis de rentabilidad realizado bajo las condiciones estipuladas arroja un VAN positivo de \$1,116.76 y una TIR de 11.49% anual, cumpliendo los estándares financieros establecidos y demostrando la solidez del proyecto. El periodo se recuperó de la inversión inicial de \$27,760 se ubica alrededor de los 6 años.

Los resultados obtenidos validan técnica y económicamente la implementación de un sistema eólico sin aspas descentralizado bajo las condiciones de viento y demanda energética determinadas en el Cantón El Tambo de Ecuador. Se logra así una solución sostenible y socialmente beneficiosa.

La simulación computacional del sistema utilizando Matlab permite validar su capacidad para satisfacer la demanda residencial rural, alcanzando una potencia máxima instantánea de 556.89 W bajo condiciones realistas de viento y consumo. El análisis exhaustivo de este estudio de prefactibilidad es crucial para respaldar la decisión final de implementar el proyecto eólico, proporcionando los fundamentos técnicos necesarios para la ejecución posterior.

RECOMENDACIONES

Realizar mediciones en el sitio de la velocidad del viento con anemómetros de alta precisión durante al menos un año para corroborar y complementar los datos utilizados del atlas eólico mundial. Esto reducirá incertidumbres y mejorará la confiabilidad de los análisis posteriores.

Estudiar la posibilidad de incrementar la altura del aerogenerador hasta 20 o 30 m, siempre que las condiciones geográficas y normativas lo permitan, para optimizar el aprovechamiento del recurso eólico. Verificar la resistencia estructural y estabilidad del sistema.

Caracterizar el consumo real de energía una vez materializado el proyecto para ajustar y expandir el sistema en consecuencia, garantizando el balance entre generación y requerimientos específicos de carga.

Considerar la realización de un estudio de impacto ambiental detallado para evaluar los posibles efectos del proyecto sobre la flora, fauna y comunidades locales, así como establecer medidas de mitigación adecuadas.

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para garantizar la operación óptima del aerogenerador a largo plazo, incluyendo inspecciones periódicas, lubricación, ajustes y reemplazo de componentes según sea necesario.

Para el sistema de almacenamiento se recomienda realizar una optimización mediante dispositivos o software que nos permitan tener datos de tiempo real según el requerimiento deseado logrando una mayor eficiencia en el sistema también se puede efectuar un sistema híbrido con paneles solares.

BIBLIOGRAFÍA

- Abimbola, O. A., Chinedu, N. N., Nwabueze, K. N., Joachim, O. G., Valentine, I. I., & Samuel, O. D. (2023). Innovative Power Management in Electro-Mechanical Systems: Exploring the New Paradigms of Energy Efficiency and System Longevity. *Engineering Science & Technology Journal*, 4(6), 401–417. <https://doi.org/10.51594/estj.v4i6.663>
- Adeyanju, A. A., & Boucher, D. (2020). Theoretical Analysis of the Bladeless Wind Turbine Performance. *Journal of Scientific Research and Reports*, December 2020, 93–106. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2020/v26i1030325>
- Ávila, A., Pérez, D., & Jiménez, J. (2022). Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos. *LADEE*, 3(1), 40–46. <https://doi.org/10.17981/ladee.03.01.2022.4>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). El papel de la transición energética en la recuperación sostenible de América Latina y el Caribe. In *Banco Interamericano de Desarrollo (BID)* (p. 50).
- Bautista, M., Mantilla, M. A., Osmá, G. A., Rey, J. M., & Castellanos, T. V. (2023). *Diseño de un módulo de simulación en tiempo real para sistemas de generación eólica usando hardware-in-the-loop*. 1–13. <https://doi.org/10.26507/paper.3052>
- Betoka-Onyama, S. P., Song-Manguelle, J., Lingom, P., Doumbia, M. L., Nyobe-Yome, J. M., & Mbock-Singock, A. (2022). An Interactive Tool for the Analysis of Mechanical Stresses on Wind Turbine Shafts. *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947967>
- BirdLife, S. (2015). *Estudio Comparativo de los Impactos ambientales producidos por los Aerogeneradores con Palas vs Aerogeneradores Vortex Bladeless*.
- Bispo, R., Bernardino, J., Coelho, H., & Lino Costa, J. (Eds.). (2019). *Wind Energy and Wildlife Impacts*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05520-2>
- Cajas, J. C., Houzeaux, G., Vázquez, M., García, M., Casoni, E., Calmet, H., Artigues, A., Borrell, R., Lehmkuhl, O., Pastrana, D., Yáñez, D. J., Pons, R., & Martorell, J. (2018). Fluid-structure interaction based on HPC multicode coupling. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 40(6), C677–C703. <https://doi.org/10.1137/17M1138868>

- Canguana, A. (2019). Vulnerabilidades socioeconomicas de Los cantones Cañar-Tambo-Suscal. In *Universidad de Cuenca* (pp. 1–40).
- Cosmas, O. C. (2023). Optimizing Energy Efficiency in Electrical Power Systems. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, *XII(XI)*, 01–07. <https://doi.org/10.51583/ijltemas.2023.121101>
- Dao, C., Kazemtabrizi, B., & Crabtree, C. (2019). Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy. *Wind Energy*, *22(12)*, 1848–1871. <https://doi.org/10.1002/we.2404>
- Dasí, D., Roldán, C., Escrivá, G., & Roldán, C. (2023). Integration of renewable resources into the electricity energy matrix. Practical case applied to a small rural municipality. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, *21(21)*, 121–126. <https://doi.org/10.24084/repqj21.244>
- Davang, S. S., Manade, S. K., Ganeshkumar, P., & Pavan, P. (2018). *Novateur Publications International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology [Ijiert] Bladeless Wind Turbine*. *5(4)*, 36–39.
- DTU Wind Energy, & World Bank Group. (2018). *Global Wind Atlas*. Global Wind Atlas. <https://globalwindatlas.info/>
- Esen, M., Bayrak, G., Cakmak, O., Celikdemir, S., & Ozdemir, M. (2019). A Consistent Power Management System Design for Solar and Wind Energy-Based Residential Applications. *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 358–363. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778531>
- Francis, S., Umesh, V., & Shivakumar, S. (2021). Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5584–5588. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.469>
- Gao, Z., Li, Z., Niu, J., Yin, Q., & Liu, K. (2023). Application of nonlinear stiffness mechanism on energy harvesting from vortex-induced vibrations. *Frontiers in Marine Science*, *10*(September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1270286>
- Gerarden, T. D. (2023). Demanding Innovation: The Impact of Consumer Subsidies on Solar Panel Production Costs. *Management Science*, *69(12)*, 7799–7820. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4662>

- Gómez, Á. (2020). *Diseño Y Optimización De Un Sistema Híbrido Renovable Con Gestión De La Demanda Y Aplicaciones En Península Y Modo Isla*. Universidad Politécnica de Valencia.
- González, J. G. (2019). *Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Google Maps. (2024). *El Tambo*. Google. <https://www.google.com/maps/place/El+Tambo/@-4.1036578,-79.3696349,46455m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x91cb33ee012e6ce9:0x29203d7d621109c0!8m2!3d-4.0991305!4d-79.2676668>
- Hosseinabad, E. R., & Moraga, R. J. (2020). The evaluation of renewable energy predictive modelling in energy dependency reduction: a system dynamics approach. *International Journal of Applied Management Science*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJAMS.2020.105295>
- Hu, W.-H., Tang, D.-H., Wang, M., Liu, J.-L., Li, Z.-H., Lu, W., Teng, J., Said, S., & Rohrmann, R. G. (2020). Resonance Monitoring of a Horizontal Wind Turbine by Strain-Based Automated Operational Modal Analysis. *Energies*, 13(3), 579. <https://doi.org/10.3390/en13030579>
- International Energy Agency. (2021). Assessing the Effects of Economic Recoveries on Global Energy Demand and CO2 Emissions in 2021. *Global Energy Review 2021*, 1–32.
- Jiang, W., Li, Y., Ma, X., Wang, Y., Chen, L., & Bi, Q. (2022). Exploiting internal resonance to improve flow energy harvesting from vortex-induced vibrations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33(3), 459–473. <https://doi.org/10.1177/1045389X211023581>
- Landera, Y., Neves, F., C Neto, R., A Benítez-Alonso, A., & Viltre, L. (2020). Revisão e comparação dos recentes requisitos de integração de fontes renováveis de energia. *Revista Científica de Engenharia Energética*, 41(3).
- López, M. Á., López, R., Pimentel, J. J., Acevedo, F., & Jaramillo, A. (2021). Banco de pruebas experimental para esquemas de control por cambio del ángulo de paso en aerogeneradores. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(1), 8–17. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052021000100008>

- Marquez, F. (2019). *Renewable Energies* (F. P. García Márquez, A. Karyotakis, & M. Papaelias, Eds.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45364-4>
- MercadoLibre. (2024). *Bateria De Gel 12v Ciclo Profundo 200ah Energía Solar*.
- Mishnaevsky, L., Jafarpour, M., Krüger, J., & Gorb, S. N. (2023). A New Concept of Sustainable Wind Turbine Blades: Bio-Inspired Design with Engineered Adhesives. *Biomimetics*, 8(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8060448>
- Mishra, N., Prakash, P., Gupta, A. S., Dawar, J., Kumar, A., & Mitra, S. (2022). *Numerical and Experimental Investigations on a Bio-Inspired Design of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine Blades With Leading Edge Tubercles* (pp. 211–224). <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8561-0.ch010>
- Missouri Wind. (2024a). *2500 Watt 12 Volt Power Inverter*.
- Missouri Wind. (2024b, January 31). *Consumos heterogéneos de energía en las tipologías de hogares del sector residencial del Ecuador*. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo. <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.6104>
- Najafian, A., & Jahangirian, A. (2023). Optimum design of morphing flaps for improving horizontal axis wind turbine performance. *Energy Science and Engineering*, 11(7), 2431–2443. <https://doi.org/10.1002/ese3.1464>
- Nguyen, T. V., Tran, T. K., Dinh, H. H., Hai, N., Ho, B., & Nam, V. (2022). *Bladeless wind turbines*. May.
- Ochoa, A., Emilio, R., Carrión, A., & Armando, J. (n.d.). *UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA ÁREA TÉCNICA*.
- Pamososuryo, A. K., Paul Mulders, S., Ferrari, R., & Van Wingerden, J. W. (2022). Periodic Load Estimation of a Wind Turbine Tower using a Model Demodulation Transformation. *Proceedings of the American Control Conference, 2022-June*, 5271–5276. <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867768>
- Perpina, R. B., Laphorn, A. C., & Barzegaran, M. R. (2018). *Multi-level-objective design optimization of permanent magnet synchronous wind generator and solar photovoltaic system for an urban environment application*. Universidad Politécnica de Catalunya.

- Quisaguano, A. (2019). *Diagnóstico del estado de las instalaciones eléctricas del campamento de la fundación nueva vida para la elaboración de una propuesta de modernización y eficiencia energética*. Escuela Politécnica Nacional.
- Rehman, S., Rehman, E., Mumtaz, A., & Jianglin, Z. (2022). A Multicriteria Decision-Making Approach in Exploring the Nexus Between Wind and Solar Energy Generation, Economic Development, Fossil Fuel Consumption, and CO2 Emissions. *Frontiers in Environmental Science*, 9(January), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.819384>
- Santos, P. E. de L., & Araújo, F. J. C. (2023). O Desenvolvimento Da Energia Eólica No Brasil: Uma Revisão Bibliográfica. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(6), 2978–2989. <https://doi.org/10.51891/rease.v9i6.10487>
- Shu, Z. R., & Jesson, M. (2021). Estimation of Weibull parameters for wind energy analysis across the UK. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(2). <https://doi.org/10.1063/5.0038001>
- Škvorc, P., & Kozmar, H. (2021). Wind energy harnessing on tall buildings in urban environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111662. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111662>
- Tasneem, Z., Al Noman, A., Das, S. K., Saha, D. K., Islam, Md. R., Ali, Md. F., R Badal, Md. F., Ahamed, Md. H., Moyeen, S. I., & Alam, F. (2020). An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges. *Developments in the Built Environment*, 4, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100033>
- Vera, J. (2020). *Diseño de un sistema eólico aislado para la electrificación rural en poblaciones dispersas en la provincia de Junín*. Universidad Nacional del centro del Perú.
- Victron Energy. (2024). *Controladores de carga BlueSolar Datasheet* (Vol. 31, Issue 0, p. 1).
- Villarrubia, M. (2013). Ingeniería de la energía eólica. In *Nuevas energías* (Vol. 1).
- Vortex Bladeless. (2023). *Vortex Bladeless | Innovative Wind Power*.

Wang, B., Geoffroy, S., & Bonhomme, M. (2022). Urban form study for wind potential development. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(1), 76–91. <https://doi.org/10.1177/2399808321994449>

Zha, W., Jin, Y., Sun, Y., & Li, Y. (2023). A wind speed vector-wind power curve modeling method based on data denoising algorithm and the improved Transformer. *Electric Power Systems Research*, 214, 108838. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108838>

ANEXOS 3: Script para la generación de datos de velocidad del viento - una vivienda

```

29 %% Datos de velocidades del viento
30 G_wind = SPT_1min;
31 G_wind_re = G_wind/(60*60);
32 [wind_res] = viento(SPT_1min);
33 figure()
34 plot(G_wind_re,wind_res,'LineWidth', 1.5)
35 xlabel('Tiempo [h]')
36 ylabel('Velocidad del Viento [m/s]')
37 xticks(0:24)
38 xlim([0 24])
39 box(gca,'on');
40 grid(gca,'on');
41 hold(gca,'off');
42 % Set the remaining axes properties
43 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12,'GridAlpha',1,...
44     'GridLineStyle','-','MinorGridAlpha',0.8,'XMinorGrid','on','XMinorTick',...
45     'on','YMinorGrid','on','YMinorTick','on','ZMinorGrid','on','ZMinorTick',...
46     'on');
47 title('Perfil de viento')
48 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12)
49
50 % Ar = ((pi*D^2)/4);
51 Ar = 0.23;
52 cp = 0.4; % coeficiente de potencia
53 p = 0.85; % kg/m^3
54 %p = 1.225;
55 fe = 2.06;
56 aerog = 40;
57 pd = aerog * Ar * 0.5 * p * fe * wind_res.^3;
58 p_wind = pd;
59

```

Figura 34. Script para carga de datos de velocidad del viento.

Fuente: Autor

ANEXOS 4: Simulación para 35 viviendas

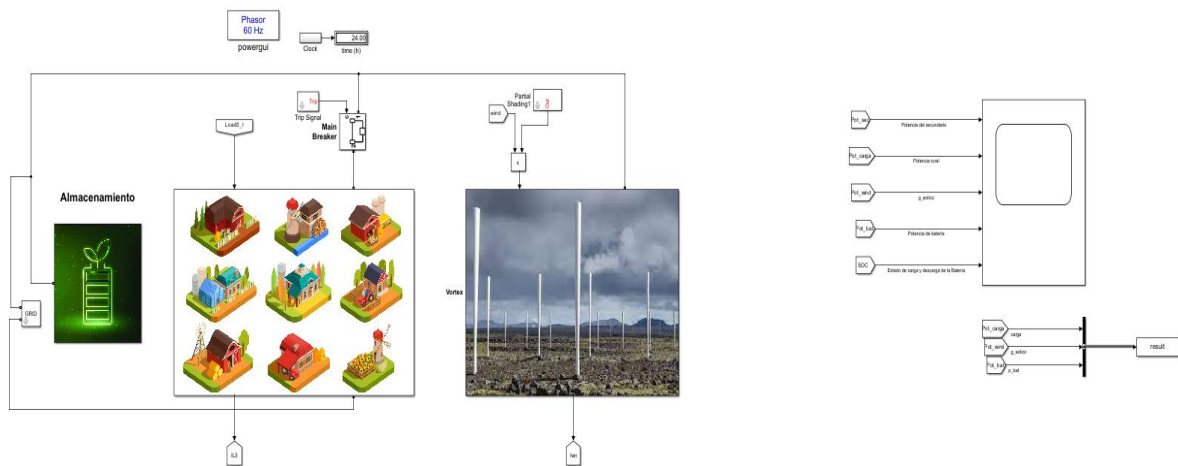


Figura 35. Diagrama de simulación para 35 viviendas.

Fuente: Autor.

ANEXOS 5: Script para la generación de datos de carga - 35 viviendas

```
1 close all
2 clc
3 clear
4 %% Guardar datos
5 load('datos.mat')
6 %% Datos carga
7 l_tiem = HPT_1min;
8 F_tiem_re = l_tiem/(60*60);
9 [carga_res] = carga(SPT_1min);
10 casas = 35;
11 carga_res = carga_res*1000*35;
12 figure()
13 plot(F_tiem_re,carga_res,'LineWidth', 1.5)
14 xlabel('Tiempo [h]')
15 ylabel('Potencia [W]')
16 xticks(0:24)
17 xlim([0 24])
18 box(gca,'on');
19 grid(gca,'on');
20 hold(gca,'off');
21 % Set the remaining axes properties
22 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12,'GridAlpha',1,...
23     'GridLineStyle','-','MinorGridAlpha',0.8,'XMinorGrid','on','XMinorTick',...
24     'on','YMinorGrid','on','YMinorTick','on','ZMinorGrid','on','ZMinorTick',...
25     'on');
26 title('Perfil de carga rural')
27 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12)
28 [I] = energia(F_tiem_re,carga_res);
29 I = I/1000;
```

Figura 36. Script para carga de datos de demanda rural – 35 viviendas.

Fuente: Autor

ANEXOS 6: Script para la generación de datos de velocidad del viento - 35 viviendas

```
29 %% Datos de velocidades del viento
30 G_wind = SPT_1min;
31 G_wind_re = G_wind/(60*60);
32 [wind_res] = viento(SPT_1min);
33 figure()
34 plot(G_wind_re,wind_res,'LineWidth', 1.5)
35 xlabel('Tiempo [h]')
36 ylabel('Velocidad del Viento [m/s]')
37 xticks(0:24)
38 xlim([0 24])
39 box(gca,'on');
40 grid(gca,'on');
41 hold(gca,'off');
42 % Set the remaining axes properties
43 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12,'GridAlpha',1,...
44     'GridLineStyle','-','MinorGridAlpha',0.8,'XMinorGrid','on','XMinorTick',...
45     'on','YMinorGrid','on','YMinorTick','on','ZMinorGrid','on','ZMinorTick',...
46     'on');
47 title('Perfil de viento')
48 set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12)
49
50 % Ar = ((pi*D^2)/4);
51 Ar = 0.23;
52 cp = 0.4; % coeficiente de potencia
53 p = 0.85; % kg/m^3
54 %p = 1.225;
55 fe = 2.06;
56 aerog = 40;
57 pd = aerog * Ar * 0.5 * p * fe * wind_res.^3;
58 p_wind = pd;
59
```

Figura 37. Script para carga de datos de velocidad del viento – 35 viviendas

Fuente: Autor

ANEXOS 7: Diseño del Aerogenerador sin Aspas y sus Partes

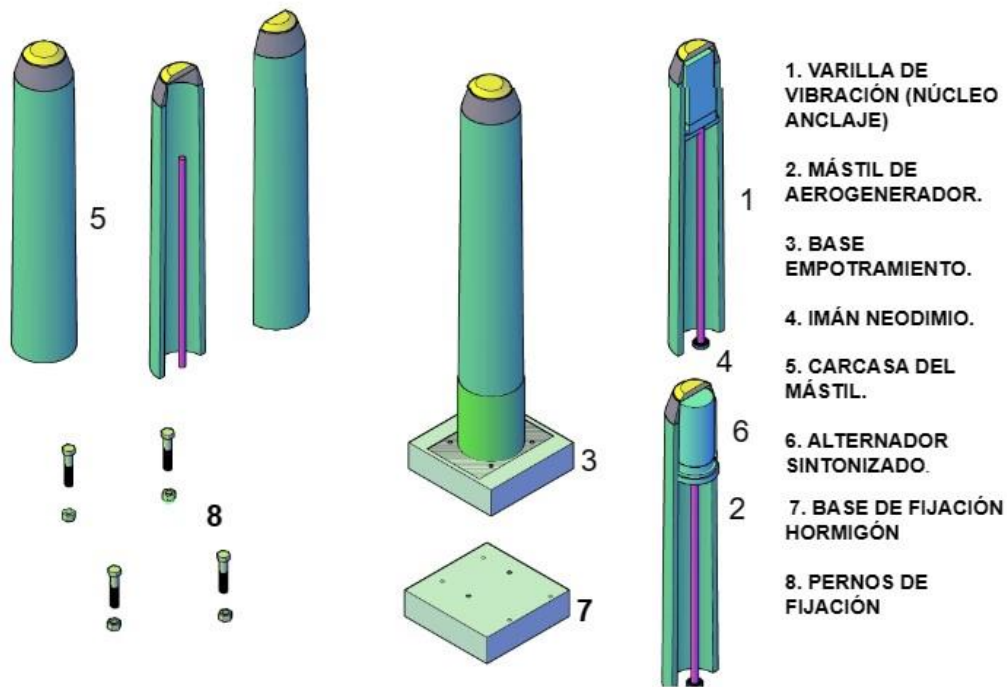


Figura 38. Diseño en 3D Autocad.

Fuente: Autor

ANEXOS 8: Curva característica del consumo rural

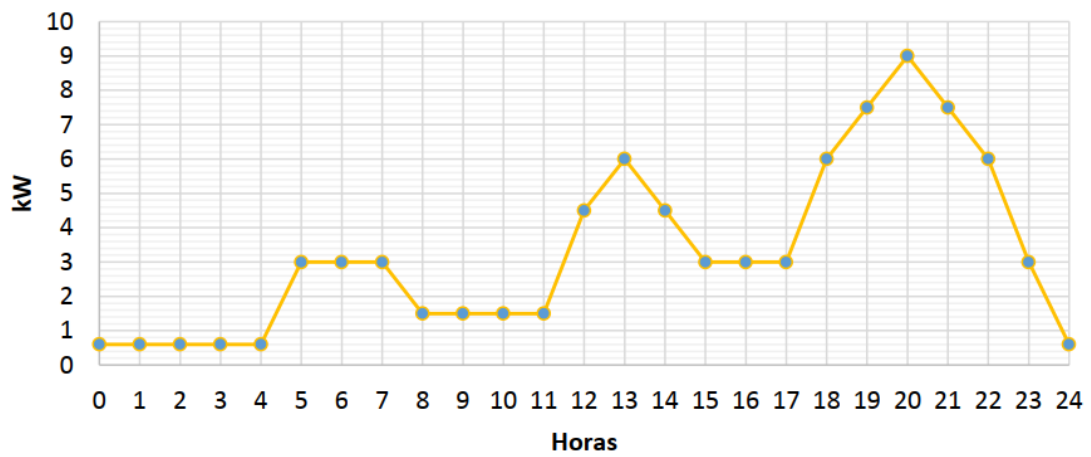



Figura 39. Consumo de carga rural.

Fuente: (Ochoa et al., n.d.)

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Jorge Luis Cazho Mainato portador de la cédula de ciudadanía N.º 030262711-2. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis De Prefactibilidad Técnica En Aerogeneradores Sin Aspas Para Sectores Rurales Del Cantón El Tambo” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de abril de 2024

F:.....


Jorge Luis Cazho Mainato

030262711-2.