UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TEMA:

"ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO GENERADORES VORTEX BLADELESS"

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

AUTOR:

Marco Vinicio Quetama Rosero

DIRECTOR (A):

MSc. Guerra Masson Julio Esteban

Ibarra, 2025

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401829171		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Quetama Rosero Marco Vinicio		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	mvquetamar@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		**TELÉFONO MÓVIL:**	0994453408

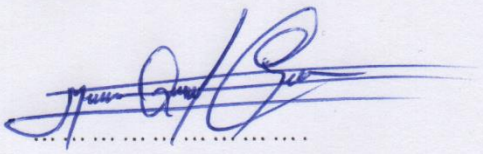
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estimación del potencial de generación eléctrica utilizando generadores Vortex Bladeless
AUTOR (ES):	Quetama Rosero Marco Vinicio
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	25/07/2025
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Guerra Masson Julio Esteban MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días del mes de Julio de 2025

EL AUTOR:



Marco Vinicio Quetama Rosero

C.I: 0401829171

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Guerra Masson Julio Esteban en calidad de director del señor estudiante Quetama Rosero Marco Vinicio certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO GENERADORES VORTEX BLADELESS"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Guerra Masson Julio Esteban. MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo, con todo mi corazón, a Dios, por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia para llegar hasta aquí.

A mis padres, por su amor incondicional, por ser mi ejemplo de esfuerzo y por brindarme su apoyo en cada etapa de mi vida.

A mi familia, que siempre creyó en mí y me animó a continuar, incluso en los momentos más difíciles.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y por guiarme en este proceso académico.

Y a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este camino: gracias por ser luz en mi trayecto.

AGRADECIMIENTOS

Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí mismo.

Quiero agradecerme por creer en mí, por levantarme cada día y mantenerme firme, incluso cuando las cosas no iban como esperaba.

Segundo, quiero agradecerme, por no rendirme, por estudiar, por trasnochar, por escribir, por corregir, y por volver a empezar cuando las cosas no salían.

Tercero, Quiero agradecerme, por no abandonar, por creer que este objetivo era posible, y por no perder la fe.

Quiero agradecerme por mantenerme de pie, y nunca tomarme ni un solo día libre.

¡Gracias a mí por ser yo en todo momento!

INDICE

DEDICATORIAS 5

AGRADECIMIENTOS 6

INDICE 7

RESUMEN 14

ABSTRACT 15

CAPITULO I 16

1.1. El problema 16

1.2. Formulación de la pregunta de investigación 17

1.3. Objetivos 17

1.3.1. Objetivo general 17

1.3.2. Objetivos específicos 17

1.4. Alcance y delimitación 17

1.5. Justificación 18

CAPÍTULO II 19

2.2. Energía eólica 22

2.3. La generación eólica 23

2.4. Aerogeneradores 24

2.5. Tipos de aerogeneradores 25

2.6. Aerogeneradores Vortex Bladeless 27

2.6.1. Dimensionado del Aerogenerador Vortex Bladeless 27

2.6.2. Sistema de sintonizado 30

2.6.3. Generación de energía 34

2.6.4. Fatiga de materiales 35

2.6.5. Densidad de potencia 36

2.6.6. Especificaciones técnicas de los aerogeneradores Vortex Bladeless 37

CAPÍTULO III 38

3.1. Metodología 38

3.2. Materiales 39

3.2.1. Base de Datos meteorológica para la predicción de recursos energéticos. 39

3.2.2. Matlab 39

3.3. Wind Atlas 40

3.4. Finite Element Method Magnetics (FEMM) 40

3.5. Evaluación del recurso eólico 41

3.6. Análisis estadístico del viento 41

3.7. Toma de datos 41

3.8. Organización de datos en Exel 42

3.9. Ecuaciones esenciales para el análisis del viento 44

3.9.1. Velocidad media y medidas de variabilidad 44

3.9.2. Desviación estándar 45

3.9.3. Coeficiente de turbulencia 46

3.9.4. Ley de Hellman 47

3.10. Potencia disponible del viento 48

3.11. Teorema de Betz 49

3.12. Distribución de Weibull 51

CAPÍTULO IV 54

4.1. Análisis de los Datos y Filtrado 54

4.1.1. Filtrado por Región Geográfica 54

4.1.2. Procesamiento y Clasificación de Datos Geográficos 58

4.2. Aplicación de la distribución de Weibull 62

4.2.1. Cálculo del parámetro k 62

4.2.2. Cálculo del parámetro de escala (c) 63

4.2.3. Corrección usando la función gamma (Γ): 63

4.2.4. Organización de los parámetros k y c 63

4.2.5. Calculo Distribución Weibull 64

4.2.6. Análisis Weibull 66

4.3. Cálculo de la potencia disponible del viento 68

4.3.1. Análisis potencia disponible del viento 69
4.4. Cálculo de la Potencia Generada 72
4.4.1. Analisis potencia generada 73
4.5. Estimación del potencial de generación eléctrica 75
4.5.1. Análisis de la estimación del potencial de generación eléctrica 76
4.6. Simulación en MATLAB y Simulink 78
4.6.1. Entrada de Datos 79
4.6.2. Cálculo de la Potencia Disponible 79
4.6.3. Cálculo de la Potencia Generada 80
4.6.4. Cálculo de la Energía Generada 80
4.6.5. Visualización de Resultados 81
4.7. Preprocesamiento de datos y Cálculo en MATLAB 81
4.7.1. Lectura de Datos desde un archivo CSV 82
4.7.2. Filtrado de Datos y Normalización 82
4.7.3. Cálculo de Potencia y Energía Genera 83
4.7.4. Preparación de Datos para Simulink 83
4.7.5. Relación Matlab y Simulink 84
4.8. Analisis de la simulación en MATLAB y Simulink 85
4.8.1. Simulaciones con velocidades de viento a 10 m de altura 85
4.8.2. Simulaciones con velocidades de viento a 50 m de altura 87
4.9. FEMM 89
4.9.1. Etapas del Modelado en FEMM definición de la Geometría y Materiales . 89
4.9.2. Generación de la Malla de Elementos Finitos 90
4.9.3. Análisis del Campo Magnético 91
4.9.4. Cálculo de Parámetros Eléctricos 92
4.10. Discusión de Resultados 93
4.10.1. Resultados de las gráficas de 10 m y 50 m de altura 93
4.10.2. Graficas comparativas a 10 m de altura 93
4.10.3. Graficas comparativas 50 m altura 95
4.10.4. Graficas comparativas 10 m y 50 m altura 97

4.10.5. Resultados de la estimacion de energia generada 106

Conclusiones 109

Recomendaciones 110

Referencias bibliográficas 110

ANEXOS 113

A. Código fuente para la simulación en Matlab 113

B. Energía generada (kW) mensual de cada coordenada a 10m altura 116

C. Energía generada (kW) mensual de cada coordenada a 50m altura 118

D. Diagrama esquemático Simulink 120

..... 120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mástil 28
Figura 2. Estator 28
Figura 3. Varilla 29
Figura 4. Esquema aerogenerador 30
Figura 5. Esquema de oscilador armónico amortiguado 31
Figura 6. Método repulsión para sintonización 32
Figura 7. Detalle sistema sintonizado 32
Figura 8. Variación de la rigidez en función del desplazamiento 33
Figura 9. Comparativa del rango de amplitud 34
Figura 10. Alternador lineal 34
Figura 11. Mecanismo de transformación del movimiento horizontal en vertical 35
Figura 12 Fuente de Datos: POWER Data Access Viewer de la NASA 42
Figura 13. Datos a 10 m de altura 43
Figura 14. datos a 50 m de altura 43
Figura 15. Polígono de puntos de la velocidad del viento sin filtrar 55
Figura 16. Puntos de la velocidad del viento filtrados 57
Figura 17. Distribución de Weibull 10m 66
Figura 18. Distribución de Weibull 50m 67
Figura 19 Potencia disponible del viento 10m 70
Figura 20. Potencia disponible del viento 50m 70
Figura 21. Potencia generada 10m 73
Figura 22. Potencia generada 50m 74
Figura 23. Energía Generada 10m 77
Figura 24. Energía generada 50m 77
Figura 25. Estructura del modelo en Simulink 78
Figura 26. Entrada de datos 79
Figura 27. bloque Potencia disponible 80
Figura 28. Bloque potencia generada 80
Figura 29. Bloque energía generada 81
Figura 30. Bloque de visualización 81
Figura 31. Simulación Julio (-1.25 -78.25) 85

Figura 32. Simulación Julio (-3.75 -78.75).....86
Figura 33. Simulación Agosto (-2.25 -80.25).....87
Figura 34. Simulación Julio (-1.25 -78.25) -50m 87
Figura 35. Simulación Julio (-3.75 -78.75)-50m 88
Figura 36. Simulación Agosto (-2.25 -80.25)-50m.....89
Figura 37. Modelado de imanes generador Vortex Bladeless.....90
Figura 38. Mallado generador Vortex bladeless 91
Figura 39. Campo magnético 92
Figura 40. Comparación potencia y energía Julio (-1.25 -78.25).....94
Figura 41. Comparación potencia y energía Julio (-3.75 -78.75).....94
Figura 42. Comparación potencia y energía Agosto (-2.25 -80.25).....95
Figura 43. Comparación potencia y energía Julio (-1.25 -78.25).....96
Figura 44. Comparación potencia y energía Julio (-3.75 -78.75).....96
Figura 45. Comparación potencia y energía Agosto (-2.25 -80.25).....97
Figura 46. Comparación 10m y 50m Julio (-1.25 -78.25) 98
Figura 47. Comparación 10m y 50m Julio (-3.75 -78.75) 98
Figura 48. Comparación 10m y 50m Agosto (-2.25 -80.25).....99
Figura 49. Comparación de todos los puntos 10m y 50m de altura 100
Figura 50. Energía generada por mes para (-1.25,-78.25) 10m 100
Figura 51. Energía generada por mes para (-3.75,-78.25) 10m 101
Figura 52. Energía generada por mes para (-2.25,-80.25) 10m 101
Figura 53. Potencia disponible, generada y energía generada para (-1.25,-78.25) 10m.....102
Figura 54. Potencia disponible, generada y energía generada para (-3.75,-78.25) 10m.....102
Figura 55. Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 10m.....103
Figura 56. Energía generada por mes para (-1.25,-78.25) 50m 103
Figura 57. Energía generada por mes para (-3.75,-78.25) 50m 104
Figura 58. Energía generada por mes para (-2.25,-80.25) 50m 104
Figura 59. Potencia disponible, generada y energía generada para (-1.25,-78.25)10m.....105
Figura 60. Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 50m.....105
Figura 61. Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 50m.....106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia 24
Tabla 2. Potencia instalada de los Aerogeneradores 26
Tabla 3. Especificaciones técnicas 37
Tabla 4. Coeficientes de fricción según el tipo de paisaje..... 47
Tabla 5. Límites geográficos del Ecuador 55
Tabla 6. Coordenadas usadas para la filtración de puntos..... 56
Tabla 7. Velocidad del viento por provincia-Wind Atlas..... 58
Tabla 8. Clasificación Cardinal de Ubicaciones Basada en Coordenadas Geográficas 59
Tabla 9. Puntos Seleccionados con velocidad del viento a 10m altura 61
Tabla 10. Puntos Seleccionados con velocidad del viento a 50m altura 61
Tabla 11. Calculo de los parámetros k y c para velocidades 10m altura..... 64
Tabla 12. Calculo de los parámetros k y c para velocidades 50m altura..... 64
Tabla 13. Calculo probabilidad de Weibull para cada coordenada a 10m altura 65
Tabla 14. Calculo probabilidad de Weibull para cada coordenada a 50m altura 65
Tabla 15. Potencia disponible del viento a 10m altura..... 68
Tabla 16. Potencia disponible del viento a 50m altura..... 69
Tabla 17. Potencia generada a 10m altura..... 72
Tabla 18. Potencia generada a 50m altura..... 73
Tabla 19. Estimación de energía generada a 10m 75
Tabla 20. Estimación de energía generada a 50m 76
Tabla 21. Relación del código Matlab con simulink 84
Tabla 22. Resultados a 10m altura..... 106
Tabla 23. Resultados a 50m de altura..... 106

RESUMEN

El panorama energético mundial está en constante transición hacia fuentes sostenibles, con énfasis en las energías renovables. Ecuador, aunque cuenta con recursos hidroeléctricos, enfrenta desafíos para garantizar un suministro energético continuo y accesible, especialmente en áreas rurales. La generación distribuida surge como una solución viable, particularmente en regiones con recursos eólicos, pero con limitaciones de espacio y costos para aerogeneradores a gran escala. A pesar de que el recurso eólico no se aprovecha completamente en el país, los generadores Vortex Bladeless ofrecen una alternativa innovadora para áreas con vientos moderados. Este estudio estima el potencial de generación eléctrica utilizando generadores Vortex Bladeless en diversos puntos del Ecuador, empleando datos meteorológicos como son Power Dav NASA y Wind Atlas.

Para estimar el potencial de energía eléctrica se utilizó la distribución de Weibull para analizar los datos de la velocidad del viento a 10 m y 50 m de altura. El desarrollo de la simulación para calcular la energía eléctrica generada se realizó en MATLAB/Simulink y FEMM para modelar el comportamiento electromagnético del generador Vortex Bladeless. Los resultados indican que los generadores Vortex Bladeless son una opción viable aprovechar el recurso eólico en zonas con vientos moderados.

Palabras clave: Velocidad del viento, Potencia del viento, Estimación de energía eléctrica, Vortex Bladeless

ABSTRACT

The global energy landscape is continuously transitioning towards sustainable sources, with an emphasis on renewable energy. Ecuador, although endowed with hydroelectric resources, faces challenges in ensuring a continuous and accessible energy supply, especially in rural areas. Distributed generation emerges as a viable solution, particularly in regions with wind resources, but with space and cost limitations for large-scale wind turbines. Despite the wind resource not being fully exploited in the country, Vortex Bladeless generators offer an innovative alternative for areas with moderate winds. This study estimates the electricity generation potential using Vortex Bladeless generators at various points in Ecuador, employing meteorological data such as PowerDav NASA and WindAtlas.

To estimate the potential electrical energy, the Weibull distribution was used to analyse wind speed data at 10 m and 50 m heights. The simulation development to calculate the generated electrical energy was performed in MATLAB/Simulink and FEMM to model the electromagnetic behaviour of the Vortex Bladeless generator. The results indicate that Vortex Bladeless generators are a viable option to harness the wind resource in areas with moderate winds.

Keywords: Wind speed, Wind power, Electrical energy estimation, Vortex Bladeless

CAPITULO I
INTRODUCCIÓN

Tema

Estimación del potencial de generación eléctrica utilizando generadores Vortex Bladeless

1.1. El problema

La situación energética mundial depende mayormente de fuentes de energía hidráulicas, el gas natural, el carbón y el petróleo. La energía eólica y solar son las nuevas tecnologías que están cambiando la manera de aprovechar los recursos naturales generando un impacto medio ambiental positivo, siendo las tecnologías en mayor progreso e instalación.

El Ecuador se enfrenta a un crecimiento proyectado tanto en su población como en su economía lo que conlleva a un aumento continuo en la demanda de energía eléctrica, este escenario refleja la necesidad urgente de estrategias que alivien este consumo apostando por la generación eléctrica a partir de fuentes limpias como la eólica, solar, biomasa entre otras. Esta transición hacia la autogeneración eléctrica busca no sólo alivianar la presión sobre el sistema nacional de energía sino también reducir el impacto ambiental del país, a pesar de este impulso hacia tecnologías más sostenibles, la realidad actual en el Ecuador revela un bajo uso de sistemas de autogeneración eléctrica qué podrían aprovechar eficientemente los recursos solar y eólico. Uno de los enfoques propuestos para suplir futuras demandas energéticas es precisamente la autogeneración aprovechando el viento como recurso clave para la producción de energía eléctrica.

Sin embargo la implementación de aerogeneradores hoy se encuentra limitada en zonas con velocidades de viento bajas y flujos turbulentos, en estos contextos los aerogeneradores convencionales no se presentan como una solución efectiva para la autogeneración eléctrica que satisfagan las necesidades energéticas locales, esta dificultad obstaculiza la capacidad de los usuarios para cubrir sus propias necesidades energéticas como la iluminación o el funcionamiento de sistemas eléctricos de bajo voltaje, lo que

impide contribuir de manera efectiva a la reducción del impacto en el sistema eléctrico nacional y reducir el impacto ambiental del país.

1.2. Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es el potencial de generación eléctrica utilizando generadores Vortex Bladeless?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar una estimación del potencial de generación eléctrica utilizando generadores Vortex Bladeless.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Describir la tecnología Vortex Bladeless para la generación de energía eléctrica

2. Determinar los factores ambientales como la velocidad del viento para generar energía eléctrica.

3. Realizar una estimación del potencial de generación eléctrica mediante los datos obtenidos de la velocidad del viento para la generación de energía eléctrica.

1.4. Alcance y delimitación

Este proyecto se enfoca en la estimación del potencial de generación eléctrica utilizando la tecnología Vortex Bladeless.

Para el desarrollo del estudio, se consideran factores ambientales como la potencia disponible del viento y la velocidad del viento. Los datos utilizados en el análisis provienen de bases de datos meteorológicas reconocidas, específicamente POWER Data

Access Viewer (DAV) de la NASA y Wind Atlas, permitiendo contar con información histórica y georreferenciada confiable. Para el análisis de las distintas clases de viento se utilizará la función densidad de probabilidad de Weibull.

Finalmente, para obtener la estimación de potencial de generación eléctrica se lo realizó mediante simulación en Matlab y con el software FEMM se obtienen las fuerzas y campos magnéticos del generador Vortex Bladeless.

1.5. Justificación

Este proyecto se enfoca en la estimación del potencial de generación eléctrica utilizando la tecnología Vortex Bladeless. El Ecuador se enfrenta a un crecimiento proyectado tanto en su población como en su economía lo que conlleva a un aumento continuo en la demanda de energía eléctrica, este escenario refleja la necesidad urgente de estrategias que alivien este consumo apostando por la generación eléctrica a partir de fuentes limpias como la eólica, solar, biomasa entre otras. Esta transición hacia la autogeneración eléctrica busca no sólo alivianar la presión sobre el sistema nacional de energía sino también reducir el impacto ambiental del país, Uno de los enfoques propuestos para suplir futuras demandas energéticas es precisamente la autogeneración aprovechando el viento como recurso clave para la producción de energía eléctrica. Los beneficiarios son las residencias ecuatorianas que mediante el aprovechamiento de los recursos renovables pueden autogenerar su propia energía para satisfacer sus necesidades energéticas adicional a esto se beneficia el sistema eléctrico nacional juntamente con un aporte para reducir el impacto ambiental del país.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En la actualidad global, el aumento de los ingresos y el aumento poblacional de aproximadamente 1700 millones de personas, el cual se ve reflejado principalmente en áreas urbanas de economías en desarrollo, deriva en un aumento estimado de la demanda energética mundial de más de un 25% para 2040. [1]

Las energías eólicas y la solar son las nuevas superpotencias energéticas. Nos impulsan hacia una era nueva, donde la generación con combustibles fósiles disminuirá; esto significará no solo una reducción de la electricidad a partir del carbón, sino también del gas. [2]

La energía solar registró un récord de 245 TWh de generación en 2022, mientras que la energía eólica sumó un máximo de 312 TWh. Como resultado, el 12 % de la electricidad a nivel mundial provino de las energías solar y eólica. Esto supone un aumento con respecto a la décima parte de la generación mundial de electricidad en 2021.En conjunto, las energías solar y eólica superaron la generación de energía nuclear en 2021 y están alcanzando el nivel de la energía hidroeléctrica. Más de sesenta países ahora generan más del 10 % de la electricidad a partir de las energías eólica y solar. [2]

La UE generó el 22 % de su electricidad a partir de las energías eólica y solar en 2022. Siete países de la UE produjeron alrededor de un tercio o más de su electricidad a partir de las energías eólica y solar en 2022; entre esos países, se incluyen Alemania (32 %), España (33 %) y Países Bajos (32 %). En la actualidad, Polonia y Hungría están por encima del promedio mundial del 12 %. En los confines de Europa, el panorama es variado: Turquía supera el promedio a nivel mundial con un 15 % y Rusia con un 1 %. En América del Norte, EE. UU. (15 %) está por encima del promedio a nivel mundial; Canadá está por debajo del promedio con un 7 %. Tres de los cinco principales

generadores en términos absolutos de las energías eólica y solar a nivel mundial están en Asia. China está por encima del promedio a nivel mundial con un 14 % (1241 TWh); Japón está apenas por debajo del promedio a nivel mundial con un 11 % (107 TWh) e India le sigue por detrás con un 9 % (165 TWh). La mayoría de los otros países en Asia empiezan a embarcarse en el viaje de las energías solar y eólica: Corea del Sur (5 %), Pakistán (4 %), Tailandia (4 %), Filipinas (2 %), Singapur (2 %), Bangladés (1 %) y Malasia (1 %). Todos los países euroasiáticos, excepto por Kazajistán, tienen casi un porcentaje de cero. [2]

En América Latina, 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 %), Ecuador (0,3 %), Venezuela (0,1 %) y Paraguay (0,0 %), han desarrollado muy poco hasta el momento. [3]
En el Ecuador actualmente el 92% de la generación de energía proviene de centrales hidráulicas, mientras que las fuentes no convencionales representan solo el 1%. [3]

En 2021, la capacidad de generación de potencia proveniente de fuentes renovables a nivel mundial fue de 3’063,926 MW, de lo cual 824,874 MW (26.9%) corresponde a eólica. La potencia eólica generada reporto un incremento del 13% desde el 2020 hasta el 2021 [4].

En el Ecuador, existe la presencia de vientos con distintas direcciones y velocidades, ocasionados por los gradientes de temperatura y presión entre los polos y la línea ecuatorial. El potencial aprovechado al 2021 es de 21 MW. [4]

Con respecto a la generación de energía eólica a pequeña escala; en el 2015 fueron instalados 990 pequeños aerogeneradores (SWT), los cuales representaban 949 MW de energía eólica generada; a nivel mundial esto representa un 0.23%. De los países que impulsa y realiza las instalaciones de los aerogeneradores de baja potencia son: China con

43%, Estados Unidos 25%, Reino Unido 15% e Italia 6.3 %. Para años posteriores, incrementó en 11% de instalaciones con respecto al año 2015, y esto se debe a que actualmente, se ha ampliado el mercado con modelos de aerogeneradores de generación a baja escala. [5]

Las centrales eólicas con aerogeneradores de alta potencia pueden presentar algunas desventajas como el área de implantación disponible, impacto visual y acústico, calidad energía entregada a la red, perdidas de transmisión y distribución de electricidad a los consumidores. Un modo de reducir algunas de estas desventajas es el uso de aerogeneradores verticales, los cuales emplean el recurso eólico para suministro de la demanda de electricidad en hogares y edificios. [6]

Las turbinas eólicas de baja potencia son un gran método para suministrar energía renovable a hogares, redes e infraestructuras urbanas, o sistemas off-grid cuando se requiere. Cuando se establecen en condiciones favorables, pueden proporcionar energía limpia de la manera más satisfactoria a pesar de que no son tan poderosos como otros métodos de generación de energía. Los aerogeneradores de pequeño tamaño han sido utilizados principalmente para el autoconsumo de instalaciones aisladas y, generalmente, conectadas a baterías. Algunos ejemplos de este sistema son los sistemas de vigilancia de carreteras, repetidores de telefonía o radio, e incluso el suministro de viviendas alejadas de la red eléctrica. [6]

Según [7].La tecnología desarrollada por Vortex Bladeless abre la puerta del autoconsumo en zonas urbanas a la energía eólica, dada la situación energética actual se hace evidente la necesidad de inversión en energías renovables tanto por su positivo impacto medioambiental como por su precio cada vez más competitivo. Sin embargo, hay zonas a las que se hace difícil la implantación de estas tecnologías ya sea por sus condiciones climáticas o por su aislamiento o dificultad de conexión a la red. En este contexto surge una posible solución de la mano de la empresa Vortex Bladeless S.L., un

nuevo tipo de aerogenerador sin partes mecánicas móviles que no solo permite aprovechar el recurso eólico en zonas urbanas, sino que parece ofrecer una esperanza de vida útil de alrededor de 20 años. Dado que su funcionamiento se basa en el fenómeno de desprendimiento de vórtices, que funciona en zonas urbanas donde la turbulencia es elevada debido a las numerosas edificaciones. Por este mismo motivo, los dispositivos se pueden situar con mayor proximidad relativa que los aerogeneradores convencionales, haciéndolos idóneos para zonas urbanas, de difícil acceso o espacios reducidos. Además, gracias a su sección circular, se adaptan rápidamente a los cambios de dirección del viento aumentando notablemente su tiempo de funcionamiento.

2.2. Energía eólica

La energía eólica es la energía que se obtiene a partir del viento, es decir, es el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire [8]. El viento se origina para igualar las presiones de las masas de aire que se encuentran a diferentes temperaturas, y no todas las masas de aire tienen la misma temperatura y presión debido a la radiación solar que calienta la atmósfera de manera desigual. El viento es una fuente con variaciones temporales, a grandes y pequeñas escalas de tiempo, y se considera un recurso energético con características específicas. El 2% de la energía solar que recibe el planeta se transforma en viento. El viento es el resultado del movimiento del aire que proviene de la tierra, el cual es provocado por la radiación solar que calienta de forma desigual las diferentes zonas del planeta. [9]

La velocidad del viento es el resultado de la acción de las fuerzas de origen diversos, como la rotación y translación de la tierra, la radiación solar, la gravedad, el gradiente de presión o fuerza bárica, Coriolis y rozamiento. El gradiente de presión crea movimiento de masa de aire, y cuanto mayor sea su valor, mayor será su velocidad. [8]

En condiciones de atmósfera libre, es decir sin rozamiento, por efecto de la fuerza de Coriolis el viento se mueve de forma paralela a las isobaras, de tal forma que, en el hemisferio norte, deja a su derecha la zona de altas presiones y a su izquierda las bajas depresiones; la situación se invierte en el hemisferio sur, donde la fuerza bárica se equilibra con la fuerza de Coriolis y se genera el denominado viento geostrófico sin rozamiento. [10]

2.3. La generación eólica

El viento es una masa de aire en movimiento y, como tal, posee energía cinética. Las turbinas eólicas, también conocidas como aerogeneradores, permiten aprovechar esta energía para generar electricidad al hacer girar el rotor que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica. Al mismo tiempo, se puede transformar esta energía del rotor en electricidad mediante un generador eléctrico. [11]

La cantidad de energía que una turbina eólica puede generar, además de la potencia del aerogenerador en sí, dependerá de las características del viento en el lugar donde se encuentre, por lo que es necesario conocer el potencial eólico en ese lugar. [7]

Los aerogeneradores eléctricos se pueden clasificar según su potencia, lo que también determinará el uso para el que han sido diseñados como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia

Denominación	Potencia	Utilización
Micro	1kW<	Embarcaciones, Sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación. etc.
Mini	1-10 kW	Granjas, viviendas aisladas, bombeo etc.
Baja	10-100 kW	Comunidades de vecinos, PYME´S (Sistemas EO-Diesel), Tratamientos de aguas
Media	100-1000 kW	Parques eólicos (en terrenos montañosos o complejos)
Alta	1000-10000 kW	Parques eólicos (en terrenos llanos o mar adentro)
Muy alta	>10000 kW	En fase de investigación y desarrollo, nuevos diseños y materiales

Nota. Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia. Fuente: [7]

En relación con la generación de energía a partir del movimiento del viento, es importante distinguir dos segmentos de producción. Por un lado, la generación eólica de gran potencia, que se conecta a las principales redes de distribución eléctrica y contribuye de manera creciente a la generación masiva de electricidad mediante la concentración de grandes turbinas en los parques eólicos. Por otro lado, las instalaciones de tecnología mini eólica, que cuentan con aerogeneradores de media y baja potencia y otras posibilidades, destinadas tanto para instalaciones aisladas como para la generación distribuida conectada a la red eléctrica. [7]

2.4. Aerogeneradores

En la última década, se ha observado un rápido crecimiento en el uso de energías renovables, especialmente solar y eólica, tanto en Europa como a nivel global [12]. Estas tecnologías desempeñan un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía

renovable y son complementarias entre sí, lo que proporciona estabilidad al suministro eléctrico durante periodos de escasez de cualquiera de ellas. [9]

En el ámbito de la innovación en la generación eólica, destaca la tecnología offshore, aunque se enfrenta al desafío de la corrosión en las partes mecánicas móviles. [13]

La ausencia de rodamientos y engranajes podría representar una ventaja significativa en este aspecto. Al desarrollar turbinas, se deben tener en cuenta diversos aspectos, como el costo, la eficiencia, el impacto ambiental y visual, así como las posibles interferencias electromagnéticas con antenas y radares. Las turbinas eólicas de baja potencia surgen como una opción prometedora para abastecer de energía renovable a viviendas, áreas urbanas y diversas infraestructuras, incluso en sistemas no conectados a la red eléctrica. [14]

En la actualidad, existen dos categorías principales de aerogeneradores para la generación de energía eléctrica: HAWT (turbinas de eje horizontal) y VAWT (turbinas de eje vertical). No obstante, ha surgido un tercer tipo patentado recientemente por la empresa "Vortex Bladeless S.L.", denominado turbinas Vortex, que son turbinas eólicas de oscilación. [7]

2.5. Tipos de aerogeneradores

Las turbinas de eje horizontal son las más comunes debido a su madurez. Estas turbinas tienen aspas, un eje de rotación y un generador, y todos sus componentes se encuentran en lo alto de un poste, con las aspas orientadas hacia el viento. El eje es horizontal al suelo, tiene un engranaje en el extremo que hace girar el generador y, en algunos casos, también consta de frenos para llevar a cabo el frenado en el caso de vientos extremos. Por otro lado, las turbinas de eje vertical tienen el eje y las aspas conectados verticalmente a la estructura. Los componentes principales están más próximos al suelo, lo que les da un centro de gravedad más estable. [15]

Los generadores Vortex no se enmarcan en ninguna de estas dos familias ya que no hay ningún eje sobre el que se efectúe ninguna rotación. Estos aerogeneradores se basan en un fenómeno llamado vorticidad, "vortex shedding" (desprendimiento de vórtices), o "vortex street effect". [7]

Estas turbinas sin aspas (bladeless) funcionan convirtiendo la energía eólica del viento en electricidad a través de la oscilación que tiene lugar cuando la estructura del dispositivo alcanza la misma frecuencia de resonancia que los vórtices de viento producidos tras la perturbación que produce la turbina en el propio viento. Este fenómeno es conocido en fluido dinámica como "Vortex Induced Vibrations" (VIV). [7]

Los diferentes tipos de turbinas se comportan de manera distinta según las características del viento. En promedio, la velocidad de inicio (punto de cut-in) para las turbinas HAWT es de alrededor de 4 m/s, mientras que para las turbinas VAWT aumenta hasta 4,5 m/s. En el caso de las turbinas Vortex, el punto de cut-in se encuentra entre 3 y 3,5 m/s, ya que esta es la velocidad del viento a la que las turbinas se sincronizan con el desprendimiento de vórtices. [7]

Tabla 2

Potencia instalada de los Aerogeneradores

Velocidad del viento	Pequeño HAWT	Pequeño VAWT	Vortex Bladeless
(m/s)	(w)	(w)	(w)
3,5	0	0	3
6	72	44	35
7	104	66	60
8	135	86	80
9	160	105	93
Velocidad Nominal	400	200	100

Nota. Comparación de los aerogeneradores. Fuente: [7]

2.6. Aerogeneradores Vortex Bladeless

Después de realizar una breve comparativa entre los diferentes tipos de aerogeneradores existentes, se procede a ofrecer una explicación detallada sobre la tecnología y el funcionamiento específico de los aerogeneradores Vortex Bladeless.

La operación de estos dispositivos es posible gracias a la resonancia o sintonía que tiene lugar cuando la oscilación de un cuerpo es producida o reforzada por un movimiento periódico externo. El aire puede inducir un movimiento oscilatorio en un cuerpo si su frecuencia natural y la frecuencia de las ondas del desprendimiento de vórtices son similares. Las vibraciones producidas en un cuerpo por vórtices son denominadas fenómeno VIV (Vortex Induced Vibration). [16]

Cuando se ven sometidos a una corriente de cualquier fluido, por ejemplo, el aire, los objetos finitos generan flujos separados sobre gran parte de su superficie, es decir, las líneas de flujo no siguen el contorno del cuerpo, sino que se “rompen” y separan en cierto punto. [16] Cuando se trata de bajos números de Reynolds, cuando esta separación se produce por primera vez, el flujo alrededor del cuerpo es regular. Sin embargo, en el caso de algunos números de Reynolds críticos, se forman dos capas finas de aire en el sotavento del objeto. Estas capas son inestables y generan grupos de vórtices conocidos como vórtices de Strouhal. [16]

2.6.1. Dimensionado del Aerogenerador Vortex Bladeless

En la estructura de los aerogeneradores Vortex Bladeless se pueden distinguir tres partes principales:

El objetivo estructural del mástil como se muestra en la Figura 1 es absorber todas las fuerzas aerodinámicas y transmitirlas a dos componentes diferentes: el estátor y la varilla. La interacción con el estátor se basa en el efecto del sistema de sintonía, y con la varilla, se vincula físicamente por la unión atornillada. [16]

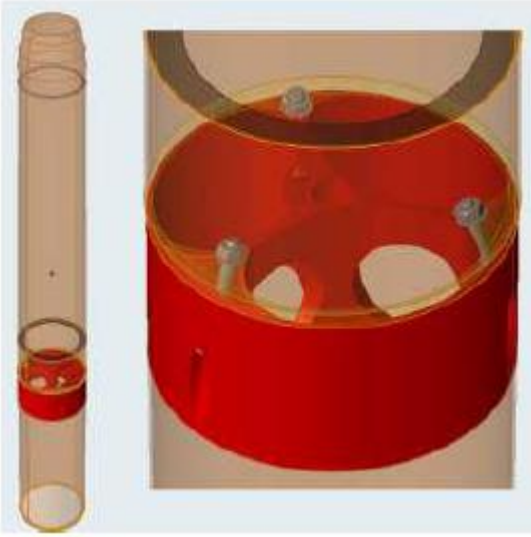


Figura. 1 Mástil del generador Vortex Bladeless [7]

Como se muestra en la Figura 2 el estátor absorbe las fuerzas resultantes en la interacción entre el mástil y el sistema de sintonía. [7]

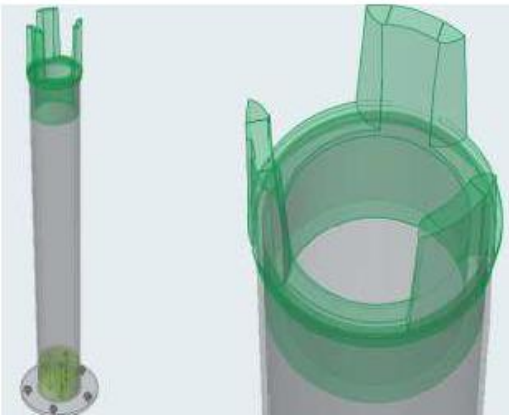


Figura. 2 Estator del generador Vortex Bladeless [7]

La varilla ilustrada en la Figura 3 absorbe las fuerzas netas resultantes para producir el movimiento de oscilación del dispositivo. Este equilibrio entre las fuerzas resultantes del estátor y la varilla es crucial para reducir el daño de la fatiga en la varilla. [7]

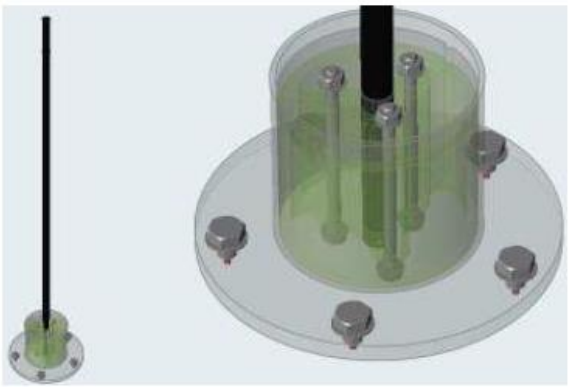


Figura 3 Varilla del generador Vortex Bladeless [7]

El mástil representa la parte rígida de la estructura que interactúa directamente con el viento. La posibilidad de generar un desprendimiento de vórtices sincronizado a lo largo de todo el mástil se logra mediante la modificación del diámetro en relación con la altura. Esta estrategia busca que las fuerzas perpendiculares a la dirección del viento realicen el trabajo en fase, resultando en un rendimiento mejorado. [14]

Es esencial que la longitud característica, que anteriormente se centraba únicamente en el diámetro de la estructura cilíndrica, aborde ahora no solo la estática del objeto, sino también su oscilación. En este contexto, la longitud característica se define como la suma del diámetro del mástil y la amplitud de su oscilación 'X', multiplicada por un factor de ajuste 'a', cuya variación depende del número de Reynolds. Un ajuste preciso de este factor facilita el desprendimiento ordenado de vórtices. [14]

En relación con el diseño del dispositivo como se ilustra en la Figura 4, se considera una barra flexible de longitud L que se extiende desde la parte más alta del aparato hasta el suelo. Dado que el mástil es un cuerpo rígido con la capacidad de oscilar en pequeños ángulos, la amplitud de oscilación puede considerarse nula a la altura L/2. En esta posición, la longitud característica coincide con el diámetro del mástil. [17]

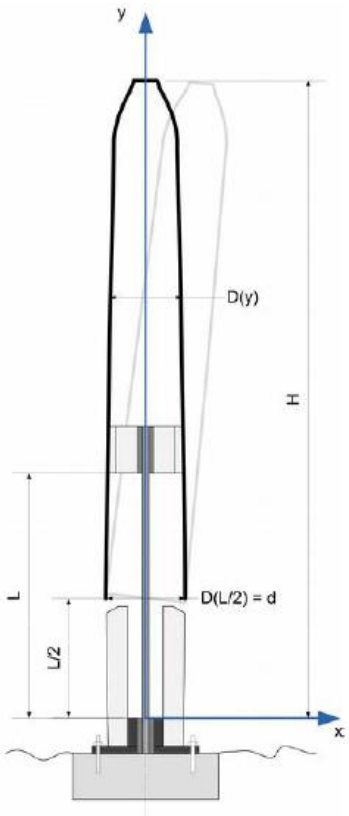


Figura 4 Esquema del aerogenerador Vortex Bladeless [7]

2.6.2. Sistema de sintonizado

La cantidad de vórtices que se desprenden está directamente relacionada con la velocidad variable del viento, la cual no mantiene una constancia. En contraste, la frecuencia natural de oscilación de una estructura permanece constante, lo que implica que el rango de velocidades del viento en el que se produce la resonancia, también conocido como el rango de lock-in, es limitado. Para incrementar las horas equivalentes al año durante las cuales el dispositivo opera, es esencial ampliar este rango de velocidades. [14]

En la Figura 5, se presenta un esquema de un oscilador armónico amortiguado, en el cual una masa m se desplaza debido a la acción de una fuerza F y está conectada a un resorte con una constante elástica k y a un amortiguador con una constante de amortiguamiento c. [14]

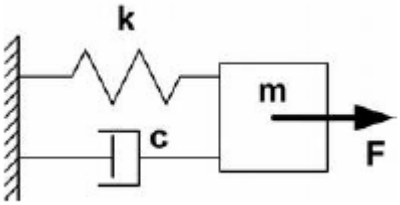


Figura 5 Esquema de oscilador armónico amortiguado [14]

El término sintonizado hace referencia a la capacidad de ajustar la frecuencia de resonancia del equipo según la velocidad del aire incidente. Esta característica se fundamenta en las ecuaciones del oscilador de Duffing, un principio físico que describe cómo debe comportarse un sistema físico para que, al incrementar la amplitud del movimiento, también aumente su frecuencia de resonancia [16].

La tecnología empleada utiliza la resonancia para provocar oscilaciones en el mástil a partir de vórtices de Von Kármán. Sin embargo, dado que la velocidad del viento cambia constantemente, la frecuencia a la que se generan los vórtices también varía de forma continua. [16]

Esto resulta en un rango muy limitado de velocidades de viento en las cuales la frecuencia de oscilación natural coincide con la frecuencia de generación de vórtices, lo que conlleva a una baja eficiencia del equipo. Para abordar este problema, se implementó un sistema de sintonización específico para Vortex. [14]

La solución para ampliar este rango se muestra en la Figura 6 que implica la incorporación de un sistema de imanes permanentes que operan en repulsión. Con base en el diseño y la disposición de estos imanes, se logra generar un sistema que incrementa pasivamente la frecuencia de resonancia con la amplitud, es decir, actúa sin necesidad de aplicar ningún control sobre él. [16]

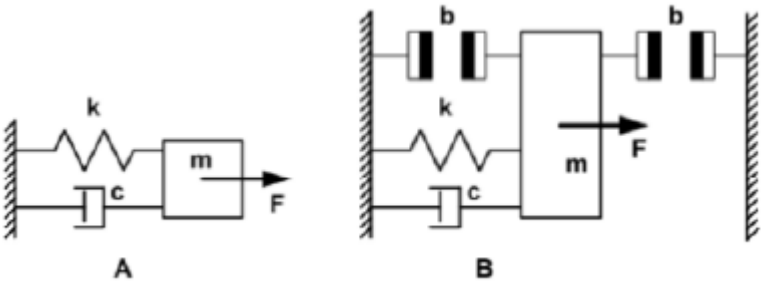


Figura 6 Método repulsión para sintonización [14]

Su funcionamiento se traduce principalmente en enfrentar dos anillos magnéticos concéntricos como se muestra en la Figura 7, dispuestos de manera que se repelen fuertemente. De esta manera se hace coincidir la frecuencia natural con la frecuencia de generación de vórtices, para las distintas velocidades de viento. [16]

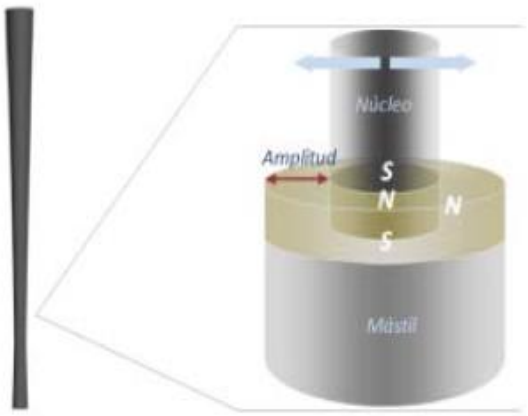


Figura 7 Detalle sistema sintonizado [16]

A mayor velocidad del viento, mayor es la fuerza de sustentación (dirección perpendicular al viento) y mayor es la fuerza de arrastre (dirección del viento). Esto hace que la distancia [L], entre los dos imanes disminuya, incrementándose en consecuencia la fuerza de repulsión como se muestra en la Figura 8. De manera similar al comportamiento de un resorte, pero con una rigidez variable en función del desplazamiento, al tratarse de una repulsión magnética. Por lo que una fuerza elevada, se corresponde con una alta rigidez. En consecuencia, a mayor velocidad, mayor rigidez del mástil. [16]

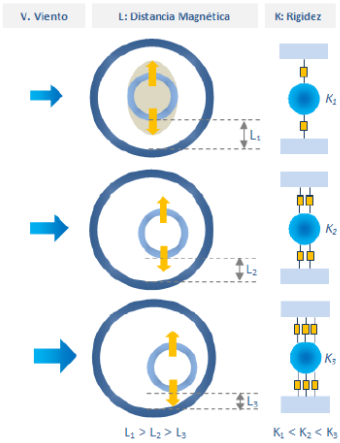


Figura 8 Variación de la rigidez en función del desplazamiento [16]

Como se ha mencionado anteriormente, una estructura rígida significa una elevada frecuencia de oscilación natural. En consecuencia, el sistema de sintonizado permite la sintonización de la frecuencia de oscilación natural con la frecuencia de desprendimiento de vórtices correspondiente, para una determinada velocidad de viento. Por lo tanto, en la Figura 9 se muestra que mediante este sistema se amplía el rango de velocidades de viento en el que la amplitud del equipo es máxima y por tanto se maximiza el periodo de operatividad del equipo. [16]

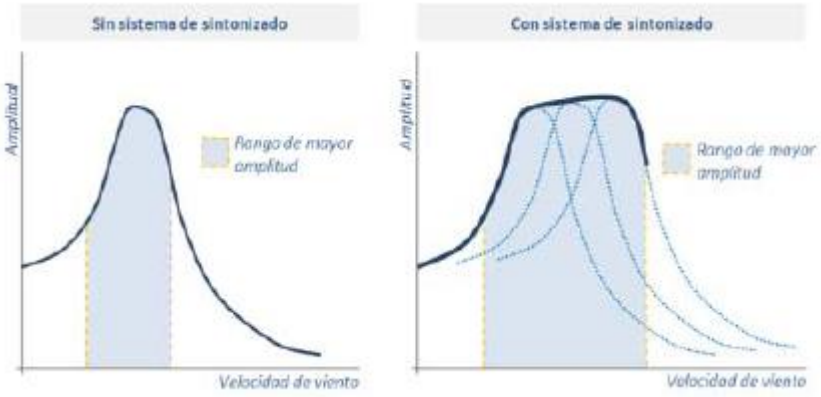


Figura 9 Comparativa del rango de amplitud [16]

2.6.3. Generación de energía

Una de las posibilidades desarrolladas para el generar electricidad consiste en un alternador lineal vertical integrado por una bobina el movimiento oscilante del imán dentro de la bobina induce una electricidad basada en la ley de Faraday como se muestra en la Figura 10. Si bien una de las mayores complejidades radica en que el movimiento horizontal del mástil debe ser convertido en un movimiento vertical alternativo del imán. [16]

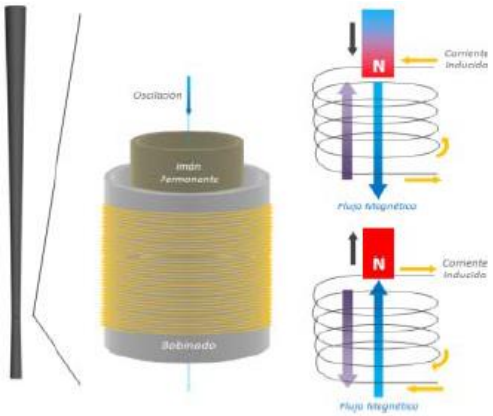


Figura 10 Alternador lineal [16]

El mecanismo Vortex Bladeless se ilustra en la Figura 11,(1) Se compone de dos cilindros, que están conectados entre sí mediante guías de fibra de carbono. Sobre el anillo exterior se coloca la bobina y el anillo interior se compone de un imán permanente. (2) Se enfrentan dos imanes, en forma de anillo, uno de ellos se sitúa en la parte inferior del mástil y el otro en la parte superior del cilindro interior. (3) Cuando los ejes de los dos anillos magnéticos son coincidentes, la fuerza de repulsión entre ellos se incrementa. Y dicha fuerza hace que el cilindro interior inferior se desplace y vibre. (4) Después, la oscilación del cilindro se repite debido a la propia tensión de las guías de fibra de carbono. [16]

La energía eléctrica generada se realiza en corriente alterna, que mediante un rectificador se convertirá en corriente continua directamente aplicable.

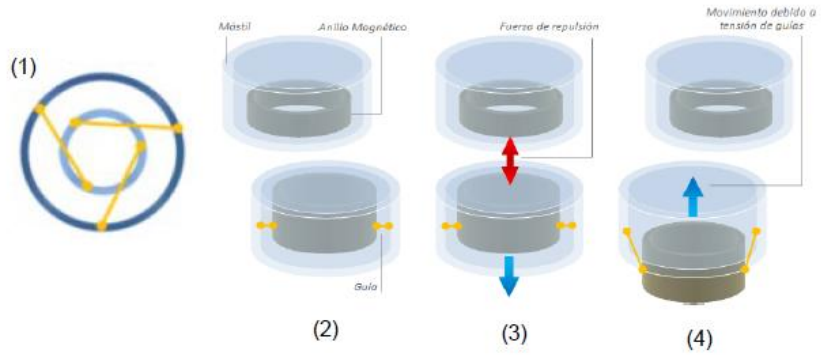


Figura 11 Mecanismo de transformación del movimiento horizontal en vertical [16]

2.6.4. Fatiga de materiales

Los aerogeneradores resonantes por VIV se caracterizan por la ausencia de elementos mecánicos que puedan degradarse por efecto de la fricción. Sin embargo, el dispositivo cuenta con una varilla de fibra de carbono sometida a carga dinámica cíclica a flexión. Este tipo de demanda produce la rotura del material por fatiga, un breve análisis preliminar da una orientación de la magnitud del problema. [17]

Aplicando el principio de prudencia se considera un dispositivo cuya flexión se produjera siempre con un ángulo máximo, sobre un mismo plano y con una frecuencia de trabajo ininterrumpida de 5Hz y 20 años de duración. [17]

2.6.5. Densidad de potencia

Uno de los desafíos fundamentales asociados con las fuentes de energía renovable radica en su baja densidad de potencia, lo que implica que generan una cantidad limitada de energía en comparación con su volumen. En comparación con las fuentes de energía tradicionales que operan en instalaciones más pequeñas, las energías renovables requieren un espacio significativo para producir la misma cantidad de energía. [15]

En el caso específico de los campos eólicos, se enfrenta la necesidad de mantener una distancia considerable entre las turbinas debido a la estela generada por sus estructuras. Esta interferencia en la corriente de viento resulta en una disminución de la eficiencia para la mayoría de las turbinas convencionales, sin embargo, los aerogeneradores Vortex Bladeless, al operar de manera oscilatoria y sin aspas, superan este desafío. Estas turbinas innovadoras permiten reducir la distancia entre dispositivos, posibilitando la instalación de un mayor número de terminales en un espacio más reducido. Además, teniendo en cuenta que la oscilación de estos aerogeneradores se mantiene alrededor de los 6 o 7 grados, cubren un área aproximada de 1 a 2 metros en total, considerando el tamaño de la turbina y el espacio necesario a su alrededor. [15]

2.6.6. Especificaciones técnicas de los aerogeneradores Vortex Bladeless

Tabla 3

Especificaciones técnicas

KWh/Mes velocidad media 5,4 m/s	24	**Velocidad de cut-in**	3,5 m/s
Potencia nominal	100 W	**Velocidad nominal**	9 m/s
Potencia máxima	109 W	**Frecuencia de oscilación nominal**	6,9 Hz
Voltaje nominal	24 VCD	**Máxima velocidad tolerada**	35 m/s
Altura total	2,75 m	**Área barrida máxima**	0.97 m
Diámetro máximo	0,261 m	**Rango de temperaturas**	menos 25° ~60°c
Máximo ángulo de amplitud	2,7°	**Numero de tornillos**	5
Frecuencia de oscilación máxima	7.5 Hz	**Diámetro tornillos**	M5
Peso neto	14 kg	**Fusible recomendado**	10 A
Velocidad de inicio	3 m/s	**Rango de ajuste del regulador**	27,1Vdc ~ 33Vdc

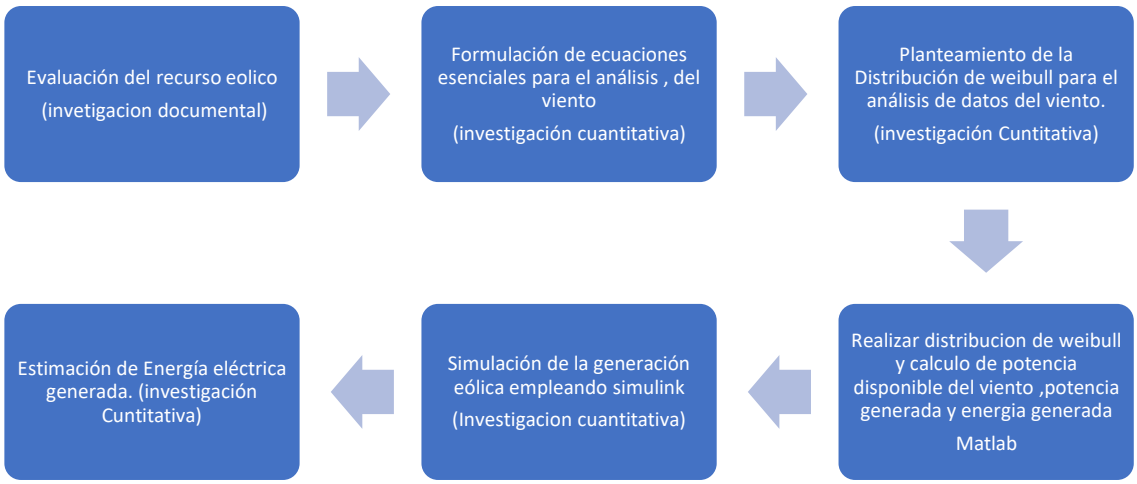
Nota. Especificaciones del generador Vortex Bladeless. Fuente: [7]

CAPÍTULO III

Para iniciar este capítulo, es fundamental comprender que el aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad depende de diversos factores, siendo la velocidad del viento uno de los más determinantes. Es esencial tener en cuenta aspectos como la velocidad media del viento, el potencial eólico, su variabilidad en el tiempo y a diferentes alturas, así como la capacidad de los aerogeneradores para convertir esa energía en electricidad. Por lo tanto, continuación se detallan los métodos utilizados para analizar el recurso eólico en áreas urbanas, empleando la tecnología Vortex Bladeless.

3.1. Metodología

En este estudio se empleó una serie de pasos metodológicos que permiten analizar el aprovechamiento del recurso eólico en áreas urbanas utilizando la tecnología de aerogeneradores sin aspas Vortex Bladeless. A continuación, se detallan las etapas que se seguirán para alcanzar los objetivos propuestos:



Primero, se realizó una descripción de las ecuaciones a utilizar, las cuales fueron fundamentales para el análisis del recurso eólico y la evaluación del rendimiento de los aerogeneradores en la producción de energía eléctrica. Mediante la aplicación de estas ecuaciones y la distribución de Weibull, se obtuvieron las funciones de distribución que representan la variabilidad de las velocidades del viento a lo largo del tiempo en una ubicación específica. Esta distribución fue clave para modelar la frecuencia con la que ocurrieron distintas velocidades del viento durante un periodo determinado, lo cual fue esencial para predecir la cantidad de energía que un aerogenerador podría generar. Finalmente, se procedió a realizar una estimación del potencial de generación de energía eléctrica con los datos obtenidos.

3.2. Materiales

3.2.1. Base de Datos meteorológica para la predicción de recursos energéticos.

El proyecto “Predicción de los Recursos Energéticos Globales” (Prediction of Worldwide Energy Resources) de la NASA tiene como objetivo mejorar los conjuntos de datos actuales de energía renovable y crear nuevos conjuntos a partir de sistemas satelitales. Uno de los objetivos del programa está enfocado en la energía renovable, la cual proporciona datos para la planificación y optimización de proyectos de energía solar y eólica. Esto incluye información sobre la radiación solar, la velocidad del viento y otros factores climáticos que afectan la generación de energía. [18]

3.2.2. Matlab

Matlab, es un programa informático creado por MathWorks, valorado por su facilidad para realizar cálculos numéricos, representaciones gráficas y simulaciones Es un entorno iterativo que simplifica la ejecución de cálculos numéricos, la gestión de

matrices, la representación de datos y la elaboración de algoritmos y modelos avanzados. Su estructura simple y su amplio abanico de funciones incluidas lo hacen una opción atractiva para ingenieros de diferentes campos. [19]

3.3. Wind Atlas

Wind Atlas es una herramienta de análisis climático que permite visualizar y evaluar la velocidad del viento en distintas ubicaciones geográficas. Proporciona datos basados en modelos atmosféricos y mediciones satelitales, lo que facilita la identificación de zonas con alto potencial eólico. En este estudio, Wind Atlas fue utilizado para obtener datos de velocidad del viento en diferentes regiones. Comparar los valores de velocidad con los datos extraídos de la base de datos de la NASA (DAV). Seleccionar los puntos más adecuados para la simulación en MATLAB/Simulink. [20]

3.4. Finite Element Method Magnetics (FEMM)

Es un software de código abierto que permite el análisis de problemas electromagnéticos mediante el método de elementos finitos (FEM). Este método divide la geometría del sistema en pequeñas regiones discretas (elementos finitos) y resuelve las ecuaciones electromagnéticas en cada una de ellas, proporcionando una aproximación numérica precisa del comportamiento del campo magnético. [21]

En esta investigación, FEMM fue utilizado para:

- Modelar la configuración de los imanes del aerogenerador Vortex Bladeless.
- Evaluar la distribución del flujo magnético dentro del generador.
- Analizar la interacción de los campos magnéticos.

3.5. Evaluación del recurso eólico

Para utilizar la energía eólica, es necesario seguir diversas etapas que incluyen actividades como la exploración del sitio y campañas de medición para evaluar el recurso. Estas fases son fundamentales en el proceso de planificación, ya que de ellas depende la elección de los aerogeneradores más adecuados para las condiciones específicas del lugar, con el objetivo de maximizar la producción de energía eléctrica**.** [22]

El estudio de la viabilidad del viento como fuente de energía exige comprender sus características. Dado su comportamiento variable y aleatorio, es necesario aplicar técnicas estadísticas para su análisis. [23]

3.6. Análisis estadístico del viento

Una evaluación precisa del recurso eólico es fundamental para contar con datos de calidad y en cantidad suficiente. El análisis estadístico facilito la comprensión de las medidas de tendencia central y dispersión, esenciales para interpretar de manera precisa los recursos de energía eólica. La velocidad media vm, y la desviación estándar σ, son los estadísticos mínimos necesarios para estimaciones de potencia. La función de distribución de probabilidad de Weibull tiene |muchas ventajas para calcular la densidad de energía eólica. [23]

3.7. Toma de datos

Para la presente investigación la velocidad del viento se tomó de la base de datos (BD) POWER Data Access Viewer (DAV) fuente que proporciona parámetros meteorológicos y solares esenciales para la evaluación y diseño de sistemas de energía

renovable. Los niveles temporales de los datos incluyen series diarias, mensuales e interanuales lo que permite un análisis detallado en diferentes escalas de temporales. [18]

Las opciones de descarga disponibles incluyen puntos individuales, regiones especificas o datos globales, la información se puede obtener en archivos en formatos como NetCDF, CSV, ASCII, JSON, ICASA y GeoTIFF. [18]

Los parámetros meteorológicos provienen del archivo MERRA-2 de la NASA, que cubre el periodo desde el 1 de enero de 1981 hasta la fecha. [18]

Para esta investigación se obtuvo los datos que corresponden al periodo de 1 año el cual tiene como periodo de inicio desde enero de 2021 hasta enero de 2022. Tomando como referencia la región de Ecuador dentro de un polígono.

Los datos descargados de la BD del proyecto Prediction if Worldwide resource (DAV) de la NASA están en formato CSV, y la altura establecida para el estudio es 10 m y 50 m como se muestra en la Figura 12.

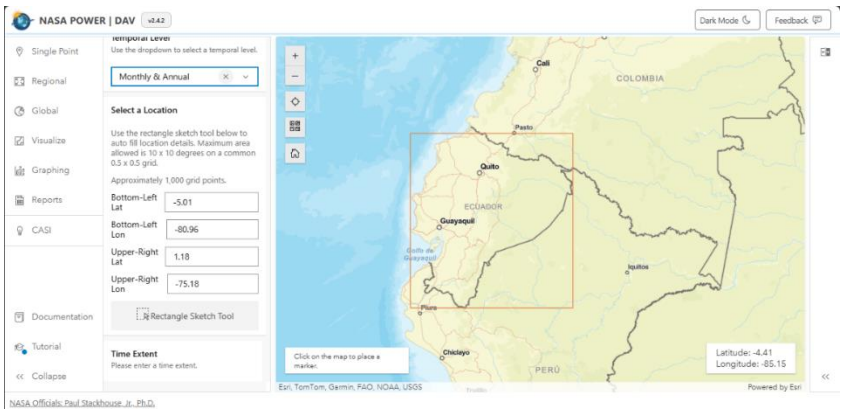
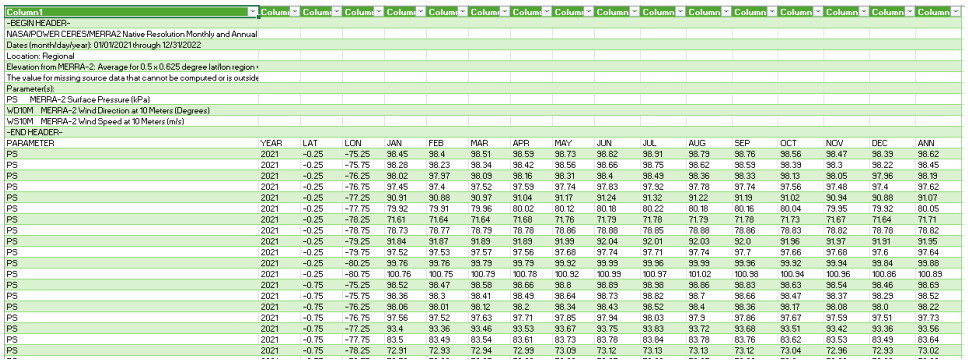


Figura 12 Fuente de Datos: POWER Data Access Viewer de la NASA [18]

3.8. Organización de datos en Exel

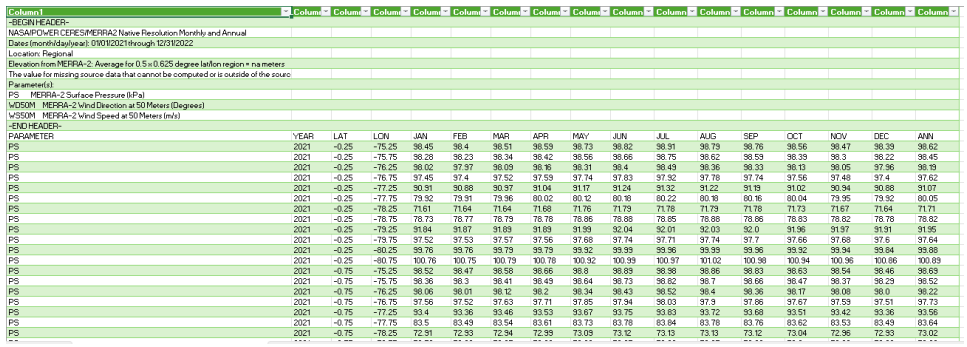
Para analizar y procesar la información obtenida, los datos descargados de la base de datos (BD) se organizan en una hoja de cálculo en formato Excel. Las variables consideradas incluyen velocidad del viento (m/s), dirección del viento (°) y presión

atmosférica (hPa) las cuales están distribuidas por meses y años. Cada registro corresponde a un mes específico dentro de un año determinado, permitiendo estructurar la información de manera ordenada para facilitar el análisis posterior como se ilustra en la Figura 13 y Figura 14.



Column1	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Column	Column	Column	Column	Column	Column	Column	Column
-BEGIN HEADER-																
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual																
Dates (month/day/year): 01/01/2021 through 12/31/2022																
Location: Regional																
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region =																
The value for missing source data that cannot be computed or is outside																
Parameter(s):																
PS MERRA-2 Surface Pressure (kPa)																
WD10M MERRA-2 Wind Direction at 10 Meters (Degrees)																
WS10M MERRA-2 Wind Speed at 10 Meters (m/s)																
-END HEADER-																
PARAMETER	YEAR	LAT	LON	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
PS	2021	-0.25	-75.25	98.45	98.4	98.51	98.59	98.73	98.82	98.91	98.79	98.76	98.56	98.47	98.39	98.62
PS	2021	-0.25	-75.75	98.28	98.23	98.34	98.42	98.56	98.66	98.75	98.62	98.59	98.39	98.3	98.22	98.45
PS	2021	-0.25	-76.25	98.02	97.97	98.09	98.16	98.31	98.4	98.49	98.36	98.33	98.13	98.05	97.96	98.19
PS	2021	-0.25	-76.75	97.45	97.4	97.52	97.59	97.74	97.83	97.92	97.78	97.74	97.56	97.48	97.4	97.62
PS	2021	-0.25	-77.25	90.91	90.88	90.97	91.04	91.17	91.24	91.32	91.22	91.19	91.02	90.94	90.88	91.07
PS	2021	-0.25	-77.75	79.92	79.91	79.96	80.02	80.12	80.18	80.22	80.18	80.16	80.04	79.95	79.92	80.05
PS	2021	-0.25	-78.25	71.61	71.64	71.64	71.68	71.76	71.79	71.78	71.78	71.78	71.73	71.67	71.64	71.71
PS	2021	-0.25	-78.75	78.73	78.77	78.79	78.78	78.86	78.88	78.85	78.88	78.86	78.83	78.82	78.78	78.82
PS	2021	-0.25	-79.25	91.84	91.87	91.89	91.89	91.99	92.04	92.01	92.03	92.0	91.96	91.97	91.91	91.95
PS	2021	-0.25	-79.75	97.52	97.53	97.57	97.56	97.68	97.74	97.71	97.74	97.7	97.66	97.68	97.6	97.64
PS	2021	-0.25	-80.25	99.76	99.76	99.79	99.79	99.92	99.99	99.96	99.99	99.96	99.92	99.94	99.84	99.88
PS	2021	-0.25	-80.75	100.75	100.75	100.79	100.78	100.92	100.99	100.97	101.02	100.98	100.94	100.96	100.86	100.89
PS	2021	-0.75	-75.25	98.52	98.47	98.58	98.66	98.8	98.89	98.98	98.86	98.83	98.63	98.54	98.46	98.69
PS	2021	-0.75	-75.75	98.36	98.3	98.41	98.49	98.64	98.73	98.82	98.7	98.66	98.47	98.37	98.29	98.52
PS	2021	-0.75	-76.25	98.06	98.01	98.12	98.2	98.34	98.43	98.52	98.4	98.36	98.17	98.08	98.0	98.22
PS	2021	-0.75	-76.75	97.56	97.52	97.63	97.71	97.85	97.94	98.03	97.9	97.86	97.67	97.59	97.51	97.73
PS	2021	-0.75	-77.25	93.4	93.36	93.46	93.53	93.67	93.75	93.83	93.72	93.68	93.51	93.42	93.36	93.56
PS	2021	-0.75	-77.75	83.5	83.49	83.54	83.61	83.73	83.78	83.84	83.78	83.76	83.62	83.53	83.49	83.64
PS	2021	-0.75	-78.25	72.91	72.93	72.94	72.99	73.09	73.12	73.13	73.13	73.12	73.04	72.96	72.93	73.02

Figura 13 Datos a 10 m de altura obtenidos de DAV NASA [18]



Column1	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Colum	Column	Column	Column	Column	Column	Column	Column	Column
-BEGIN HEADER-																
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual																
Dates (month/day/year): 01/01/2021 through 12/31/2022																
Location: Regional																
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = na meters																
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sourc																
Parameter(s):																
PS MERRA-2 Surface Pressure (kPa)																
WD50M MERRA-2 Wind Direction at 50 Meters (Degrees)																
WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)																
-END HEADER-																
PARAMETER	YEAR	LAT	LON	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
PS	2021	-0.25	-75.25	98.45	98.4	98.51	98.59	98.73	98.82	98.91	98.79	98.76	98.56	98.47	98.39	98.62
PS	2021	-0.25	-75.75	98.28	98.23	98.34	98.42	98.56	98.66	98.75	98.62	98.59	98.39	98.3	98.22	98.45
PS	2021	-0.25	-76.25	98.02	97.97	98.09	98.16	98.31	98.4	98.49	98.36	98.33	98.13	98.05	97.96	98.19
PS	2021	-0.25	-76.75	97.45	97.4	97.52	97.59	97.74	97.83	97.92	97.78	97.74	97.56	97.48	97.4	97.62
PS	2021	-0.25	-77.25	90.91	90.88	90.97	91.04	91.17	91.24	91.32	91.22	91.19	91.02	90.94	90.88	91.07
PS	2021	-0.25	-77.75	79.92	79.91	79.96	80.02	80.12	80.18	80.22	80.18	80.16	80.04	79.95	79.92	80.05
PS	2021	-0.25	-78.25	71.61	71.64	71.64	71.68	71.76	71.79	71.78	71.78	71.78	71.73	71.67	71.64	71.71
PS	2021	-0.25	-78.75	78.73	78.77	78.79	78.78	78.86	78.88	78.85	78.88	78.86	78.83	78.82	78.78	78.82
PS	2021	-0.25	-79.25	91.84	91.87	91.89	91.89	91.99	92.04	92.01	92.03	92.0	91.96	91.97	91.91	91.95
PS	2021	-0.25	-79.75	97.52	97.53	97.57	97.56	97.68	97.74	97.71	97.74	97.7	97.66	97.68	97.6	97.64
PS	2021	-0.25	-80.25	99.76	99.76	99.79	99.79	99.92	99.99	99.96	99.99	99.96	99.92	99.94	99.84	99.88
PS	2021	-0.25	-80.75	100.76	100.75	100.79	100.78	100.92	100.99	100.97	101.02	100.98	100.94	100.96	100.86	100.89
PS	2021	-0.75	-75.25	98.52	98.47	98.58	98.66	98.8	98.89	98.98	98.86	98.83	98.63	98.54	98.46	98.69
PS	2021	-0.75	-75.75	98.36	98.3	98.41	98.49	98.64	98.73	98.82	98.7	98.66	98.47	98.37	98.29	98.52
PS	2021	-0.75	-76.25	98.06	98.01	98.12	98.2	98.34	98.43	98.52	98.4	98.36	98.17	98.08	98.0	98.22
PS	2021	-0.75	-76.75	97.56	97.52	97.63	97.71	97.85	97.94	98.03	97.9	97.86	97.67	97.59	97.51	97.73
PS	2021	-0.75	-77.25	93.4	93.36	93.46	93.53	93.67	93.75	93.83	93.72	93.68	93.51	93.42	93.36	93.56
PS	2021	-0.75	-77.75	83.5	83.49	83.54	83.61	83.73	83.78	83.84	83.78	83.76	83.62	83.53	83.49	83.64
PS	2021	-0.75	-78.25	72.91	72.93	72.94	72.99	73.09	73.12	73.13	73.13	73.12	73.04	72.96	72.93	73.02

Figura 14 datos a 50 m de altura obtenidos de DAV NASA [18]

Cada fila de la tabla representa un conjunto de mediciones para un parámetro específico, registrado en una ubicación particular (latitud y longitud) y durante un año determinado.

Dado que los datos se encuentran organizados en su forma cruda, estos serán analizados posteriormente para extraer las estadísticas relevantes, como la velocidad promedio, la desviación estándar, los valores extremos, y para realizar ajustes con

distribuciones probabilísticas como Weibull. Este análisis permitirá comprender las características del viento.

3.9. Ecuaciones esenciales para el análisis del viento

3.9.1. Velocidad media y medidas de variabilidad

Los datos de estadística son un factor de importancia. La media o promedio de la velocidad del viento [m/s], reducen la cantidad de datos, y se determina a través de la ecuación que se muestra a continuación.

$$v_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v = v_i = \frac{v_1 v_2 + \cdots v_n}{n} \quad (1)$$

Donde:

- vm velocidad media del viento [m/s]
- v velocidad de viento cada 0.1 segundos o 10 Hz [m/s].
- n número de datos (varía según sea el intervalo)

La velocidad media en la cual operan usualmente las turbinas eólicas se encuentra entre los 2.5 y 25 m/s. [23]

3.9.2. Desviación estándar

El papel de la variabilidad en la velocidad del viento es crucial en el estudio de datos eólicos. La desviación estándar de un grupo de medidas es equivalente a la raíz cuadrada de la varianza, o sea, la desviación que los datos muestran en relación con la velocidad media, y se manifiesta mediante las ecuaciones siguientes:

$$\sigma = [[(v - v_m) * f] * 0.5] \quad (2)$$

Donde:

- **σ** es la desviación estándar
- v es la velocidad del viento (m/s) en un instante o rango específico
- vm es la velocidad media del viento
- f **es** la frecuencia relativa o probabilidad asociada con una velocidad del viento específica.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(v_i - v_m)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde:

- **σ** es la desviación estándar
- vi es la velocidad del viento en el instante i
- vm es la velocidad media del viento
- **n es** el número de observaciones

3.9.3. Coeficiente de turbulencia

El Coeficiente de variación (CV) de la velocidad medirá la variabilidad temporal en todas las escalas temporales, representándose como el cociente entre la desviación estándar (σ) y la velocidad media (vm) expresada en porcentaje [23].

$$CV = \frac{\sigma}{v_m} x100 \tag{4}$$

Donde:

- **σ** desviación estándar
- $\boldsymbol{vm}$ velocidad media

Es crucial entender la turbulencia presente para valorar los esfuerzos que experimentan los aerogeneradores. El coeficiente de turbulencia se establece como la relación entre la desviación estándar y la velocidad promedio, tal como se ilustra en la ecuación. [23]

$$I_t = \frac{\sigma}{v_m} \tag{5}$$

Donde:

- **It** índice de turbulencia
- **σ** desviación estándar
- $\boldsymbol{vm}$ velocidad media

3.9.4. Ley de Hellman

Para determinar la velocidad media a diferentes alturas se utiliza la ley exponencial de Hellman:

$$v_h = v_{ref}\left(\frac{h}{h_{ref}}\right) \tag{6}$$

Donde:

- $\boldsymbol{vh}$ velocidad a la altura h
- $\boldsymbol{vref}$ velocidad de referencia
- $\boldsymbol{href}$ altura de referencia

En la cual v_h es a velocidad a la altura h, $vref$ y $href$ son la velocidad y altura de referencia, respectivamente, y el exponente α (coeficiente de fricción) se determina experimentalmente y varía con la altura, hora, estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura. La Tabla 4 muestra algunos de los valores que toma según las características de la zona a analizar. [7]

Tabla 4
Coeficientes de fricción según el tipo de paisaje.

Tipo de paisaje	Coeficiente de fricción α
Lagos, océanos, etc.	0,10
Praderas	0,15
Cultivos altos, setos y arbustos	0,20
Tierra muy boscosa	0,25
Pequeña ciudad con árboles y arbustos	0,30
Áreas de ciudad con altos edificios	0,40

Nota. Coeficientes de fricción. Fuente: [7]

La energía obtenida del viento se relaciona directamente con su velocidad, y dicha velocidad se incrementa conforme se eleva la altura. Esto implicaría la necesidad de analizar la distribución de Hellman a lo largo de toda la longitud del mástil del aerogenerador. [7]

3.10. Potencia disponible del viento

El recurso eólico disponible y las características de las turbinas eólicas son dos componentes esenciales de los datos técnicos que se requieren para el proceso general de utilización de la energía eólica. La velocidad media del viento es importante, pero no es suficiente para cuantificar la cantidad de energía que pueda generarse en el sitio. También es necesario tener en cuenta las velocidades extremas del viento, la turbulencia y la consistencia del viento al evaluar el potencial eólico del lugar. El viento produce energía cinética, originada por la masa de aire en desplazamiento. Es posible calcularlo utilizando la ecuación siguiente. [23]

$$E_{generada} = \frac{P_{generada} * t}{1000} \quad (7)$$

Donde:

- ***E* generada** Energía generada (kWh)
- ***P* generada** Potencia generada (W)

De acuerdo con la ecuación de continuidad en la mecánica de fluidos, la razón del flujo de masa se relaciona con la densidad del aire ρ, cuyo valor estándar es de 1.225 kg/m³ (varía en función de la presión y la temperatura) y la velocidad del viento $\boldsymbol{v}$. Por ende, la energía cinética por unidad de tiempo *P*, o potencia [23]. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} pv^3 A \quad (8)$$

Donde:

- A es el área barrida del aerogenerador.
- ρ es la densidad del aire en (kg/m³) que atraviesa dicha área.
- v la velocidad del viento en el instante en que atraviesa el área barrida por el dispositivo.

La densidad de energía eólica se refiere a la energía total del viento por unidad de superficie en sentido perpendicular a su dirección durante un periodo de tiempo específico. El modo en que las velocidades del viento influyen en la densidad energética que se puede conseguir en un mes o año común, se obtiene al calcular el número de horas en las que estas velocidades se presentan durante el mes o año, utilizando la distribución de probabilidad de Weibull. [23]

La potencia generada depende de la potencia disponible y de la eficiencia del generador:

$$P_{generada} = n * P_{viento} \quad (9)$$

Donde:

- ***P* generada** Potencia generada (W)
- η Eficiencia del generador
- ***P* viento** Potencia disponible del viento (W)

3.11. Teorema de Betz

La transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica debe llegar al límite de Betz en la mayor medida posible. De acuerdo con el cual no se puede obtener más del 59,3% de la energía cinética del viento para una sección constante, dado que no se puede frenar completamente el flujo, solo se puede disminuir, y donde el límite

de eficiencia es Cp= 0.593. La teoría del disco actuador lo determinó, fundamentada en las leyes de conservación de flujo. [24]

En 1919, Albert Betz demostró que para obtener la energía del viento se requiere disminuir su velocidad. Esto se denomina el teorema de Betz y enuncia lo siguiente: La máxima energía que puede extraerse del flujo de aire con una turbina ideal es igual al 59.3% de la energía cinética del flujo incidente. [24]

Este teorema se estableció debido a que el rotor eólico no tiene la capacidad de transformar toda la energía cinética del viento en energía de rotación. De esta manera, si ocurriera, la velocidad del viento en la salida del rotor sería cero, obstaculizando la entrada de más viento, por lo que no podría absorber más energía. No obstante, la cantidad de potencia eólica disponible que puede producir podría disminuir hasta un 40%, al tomar en cuenta factores aerodinámicos y mecánicos. [23]

La potencia que se puede extraer del viento con un aerogenerador está determinada por la ecuación:

$$P = Cp \cdot \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot V^3 \qquad (10)$$

- $\boldsymbol{P}$ Potencia generada (W).
- $\boldsymbol{Cp}$ Coeficiente de potencia (eficiencia del sistema, depende del diseño y puede variar, pero su límite teórico es el límite de Betz, aproximadamente 59.3% o 0.593).
- **Φ** Densidad del aire (kg/m³), que varía con la altitud, presión y temperatura.
- **D** Diámetro del área barrida por el sistema (m).
- **V** Velocidad del viento (m/s).

3.12. Distribución de Weibull

El método más efectivo para valorar el recurso eólico es registrar la velocidad del viento en el lugar que se requiera examinar. Esta labor puede tornarse compleja debido al tiempo dedicado y al precio de los instrumentos necesarios para las mediciones. La incidencia de las velocidades del viento se puede describir de manera más precisa a través de la función de distribución de probabilidad de Weibull, que incluye dos parámetros: el parámetro de forma k y el parámetro de escala, c. [7]

Después de haber determinado la velocidad media del viento (vm) y la desviación estándar (σ), es posible establecer los parámetros: el factor de forma k (adimensional) que se presentan a continuación.

$$k = \left[\frac{\sigma^{-1.086}}{v_m}\right] \tag{11}$$

Donde:

- $\boldsymbol{vm}$ es la velocidad media
- $\boldsymbol{\sigma}$ la desviación típica

El factor de escala c (m/s), cuyos valores se pueden obtener mediante las ecuaciones:

$$c = \left(\frac{v_m}{c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4}\right) \tag{12}$$

Donde:

- $\boldsymbol{C}$ velocidad de escala ajustada
- $\boldsymbol{vm}$ es la velocidad media
- **C0, C1, C2, C3, C4:** son coeficientes ajustados experimental o analíticamente que determinan la influencia de **X** y sus potencias en el cálculo del denominador.

$$x = 4\left(1 + \frac{1}{k}\right) - 6 \tag{13}$$

Donde:

- **x:** es una variable adimensional utilizada para describir correcciones aerodinámicas.
- **k:** es un parámetro que describe características específicas del flujo o del aerogenerador.

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \tag{14}$$

Donde:

- **c:** Parámetro de escala que define el rango general de las velocidades del viento.
- ***vm* :** Velocidad media del viento en un punto y mes específico.
- **Γ(1+1/k):** Función gamma evaluada en 1+1/k, que ajusta el cálculo según la forma de la distribución.
- **k:** Parámetro de forma que describe la concentración o dispersión de las velocidades alrededor de la media.

Una vez calculados los parámetros ***k*** y ***c***, se obtiene la distribución de probabilidad de Weibull con la ecuación.

$$P(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \tag{15}$$

Donde:

- **P*v*** Función de densidad de probabilidad para la variable (v)
- **C** es el parámetro de escala de Weibull en [m/s]

- **K** es el parámetro de forma
- **Exp** Función exponencial que asegura que la función de densidad de probabilidad se normalice correctamente

Donde C es el parámetro de escala de Weibull en m/s; una medida de la velocidad característica del viento de la distribución, siendo proporcional a la velocidad media del viento. K es el parámetro de forma; especifica la forma de la distribución y toma valores entre 1 y 3, un valor muy pequeño de k representa vientos muy variables mientras que los vientos constantes están caracterizados por mayores valores de k.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS Y RESULTADOS

Este capítulo tuvo como objetivo realizar la estimación del potencial de generación eléctrica mediante los datos de la velocidad del viento para la generación de energía eléctrica. En el capítulo, se comenzó por analizar los datos para descartar valores atípicos para minimizar errores en los resultados, de modo que los resultados fueran lo más cercano a la realidad, los datos analizados correspondieron a la velocidad del viento a alturas de 10 m y 50 m y se estimó la generación de energía eléctrica utilizando el aerogenerador Vortex Bladeless. Para ello, se aplicó la distribución de Weibull, el potencial disponible del viento, la potencia generada en vatios y la estimación de la energía eléctrica generada. Finalmente, el modelo se implementó en MATLAB y Simulink para realizar simulaciones detalladas.

4.1. Análisis de los Datos y Filtrado

En este apartado se detalla el proceso de filtrado y análisis de los datos de velocidad del viento obtenidos para la estimación del potencial de generación utilizando aerogeneradores Vortex Bladeless. A continuación, se describen las etapas realizadas para garantizar que los datos utilizados sean representativos y adecuados para el análisis.

4.1.1. Filtrado por Región Geográfica

Los datos iniciales incluían mediciones de velocidad del viento para una región amplia, sin restricciones específicas de ubicación. Dado que el estudio se enfoca en Ecuador, se definieron límites geográficos aproximados para el país, considerando que el país está en la región que se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5

Límites geográficos del Ecuador

Región	Latitud	Longitud
Norte	-5	−81
Noreste	2	−81
Este	0	-81
Sureste	0	−75

Nota.Límites geográficos donde se encuentra ubicado Ecuador. [18]

Cualquier punto de medición que se encontrara fuera de estos límites fue descartado, asegurando que las velocidades analizadas pertenecieran únicamente a ubicaciones dentro del territorio ecuatoriano. Este paso fue crucial para evitar incluir valores atípicos de regiones irrelevantes al objetivo del estudio.

En la siguiente figura se muestra el polígono de datos originales que se obtuvo de la base de datos de la NASA estos datos pertenecen a la región de Ecuador, pero hay puntos que están alejados de los límites del país. Como se ilustra en la Figura 15 la distribución de puntos representa las velocidades del viento en el Ecuador a una altura de a 10 m y 50 m de altura. Aunque el polígono incluye puntos fuera de los límites geográficos del Ecuador, estos fueron filtrados para centrarse únicamente en el área de interés correspondiente al análisis del recurso eólico.

Figura 15 Polígono de puntos de la velocidad del viento sin filtrar [30]

A continuación, se realizó el tratamiento de datos aplicando un filtro, a los datos de latitud y longitud para ello se tomaron como limites los siguientes puntos, como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6

Coordenadas usadas para la filtración de puntos

Puntos cardinales	Latitud	Longitud
Norte	1.35	−78.75
Noreste	0.15	−75.94
Este	−1.47	−75.57
Sureste	−2.87	−77.77
Sur	−4.92	−79.16
Suroeste	−4.04	−80.28
Oeste	−3.50	−80.75
Noroeste	−0.34	−80.42

Nota. Coordenadas para el filtrado de puntos en el territorio ecuatoriano. Fuente: [18]

Estos puntos permiten conectar como límites geográficos para definir el área válida para el análisis dentro del territorio ecuatoriano, aquellos puntos fuera de estos límites fueron descartados, para la visualización de estos puntos se cargó el archivo de Excel en Google My Maps como se muestra en la Figura 16.

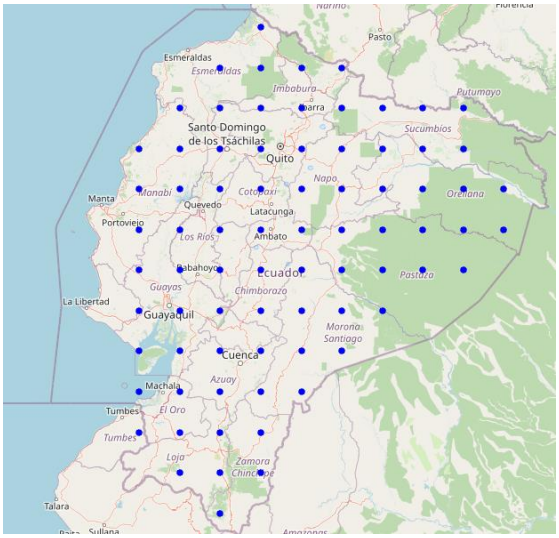


Figura 16 Puntos de la velocidad del viento filtrados [30]

Los datos iniciales de velocidad del viento provienen de la base de datos de la NASA (DAV - Data Access Viewer), los cuales corresponden a registros de velocidad a 10 metros de altura para distintas ubicaciones en Ecuador. Sin embargo, al analizar estos valores, se identificó que las velocidades registradas eran considerablemente más bajas de lo esperado para diversas regiones.

Para mejorar la representatividad de los datos y aproximarlos a valores reales observados en la región, se utilizó como referencia Wind Atlas, el cual proporciona estimaciones de velocidad media del viento por provincia. Este ajuste permitió corregir las desviaciones observadas en los datos originales y obtener una representación más precisa del recurso eólico en Ecuador

Los valores de velocidad media del viento proporcionados por el Wind Atlas para cada provincia del Ecuador se representan en la Tabla 7:

Tabla 7

Velocidad del viento por provincia-Wind Atlas

Provincia	Velocidad media (m/s)	Provincia	Velocidad media (m/s)
Azuay	6.62	Napo	3.48
Bolívar	6.56	Orellana	1.07
Carchi	5.91	Pastaza	0.86
Cañar	6.55	Pichincha	6.13
Chimborazo	6.76	Santa Elena	3.11
Cotopaxi	6.48	Santo Domingo	1.53
El Oro	4.58	Sucumbíos	1.93
Esmeraldas	2.11	Tungurahua	5.08
Guayas	3.08	Zamora C.	4.09
Imbabura	6.10	Napo	3.48
Loja	6.64	Orellana	1.07
Los Ríos	1.84	Pastaza	0.86
Manabí	2.84	Pichincha	6.13
Morona Santiago	2.32	Santa Elena	3.11

Nota. Velocidades medias del viento en m/s Wind Atlas. Fuente: [20]

Los registros de la NASA a 10 metros de altura fueron extrapolados para evaluar el potencial eólico a 50 metros, una altura más representativa para aplicaciones de generación de energía eólica. Para ello, se utilizó la ecuación de Hellman, que permitió estimar la velocidad del viento en diferentes alturas con base en un coeficiente de rugosidad, es el coeficiente de rugosidad del terreno.

Se utilizó un valor estándar de 0.14, correspondiente a un terreno abierto con vegetación baja.

4.1.2. Procesamiento y Clasificación de Datos Geográficos

En este análisis, se trabajó con un conjunto de datos geográficos que incluían coordenadas de latitud (LAT) y longitud (LON) de diversas ubicaciones en Ecuador, junto con datos de velocidad del viento mensual y anual. El objetivo principal fue clasificar

estas ubicaciones en zonas geográficas según los puntos cardinales, para facilitar un análisis más estructurado de las regiones del país. A continuación, se describe el proceso realizado.

Para analizar de manera más clara los datos geográficos dentro del territorio ecuatoriano, cada ubicación fue clasificada de acuerdo con su posición en relación con los puntos cardinales. Esta clasificación permite organizar las ubicaciones según su latitud (LAT) y longitud (LON), y facilita la identificación de patrones específicos de viento en cada región.

La clasificación por zonas cardinales es fundamental para:

- Identificar diferencias en los patrones de viento según la ubicación geográfica.
- Priorizar regiones con mayor potencial para la implementación de aerogeneradores.
- Simplificar la interpretación de los datos geográficos mediante una división lógica.

La clasificación se realizó para las dos alturas de velocidad de 10 m y 50 m de altura como se muestra en la Tabla 8, el proceso y el análisis de los datos es igual para las dos alturas debido a que es el mismo territorio y las coordenadas son las mismas para ambos casos. Un ejemplo práctico de esta clasificación se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 8
Clasificación Cardinal de Ubicaciones Basada en Coordenadas Geográficas

Latitud	Longitud	Velocidad media Anual (m/s)	Zona Cardinal
0.25	-78.25	3.32	Norte-Este
0.25	-79.75	3.19	Norte-Oeste
-1.75	-78.25	3.39	Sureste
-3.75	-80.25	3.94	Suroeste

Nota. Clasificación de coordenadas del territorio ecuatoriano. Fuente: [18]

El análisis del potencial de generación eléctrica a partir del viento requiere datos detallados sobre la velocidad del viento en distintas ubicaciones geográficas. Dado que la base de datos original contenía una gran cantidad de puntos, fue necesario aplicar un proceso de filtrado para identificar las coordenadas con las mejores condiciones de viento. Este proceso permitió enfocar la estimación del potencial de generación eléctrica en los puntos con velocidades óptimas, descartando aquellos con valores insuficientes.

Para optimizar el análisis, se seleccionaron únicamente las ubicaciones donde la velocidad anual del viento (ANN) superara el promedio general de todas las coordenadas disponibles. De esta manera, se garantizó que solo se consideraran los puntos con condiciones favorables para la generación de energía.

El proceso de filtrado consistió en analizar la velocidad del viento en diversas coordenadas geográficas y seleccionar tres puntos representativos con las siguientes características:

- **Punto de máxima velocidad:** Representa el escenario más favorable para la generación de energía.
- **Punto de velocidad intermedia:** Refleja una condición promedio dentro de los puntos óptimos.
- **Punto de menor velocidad dentro de los seleccionados:** Permite evaluar la generación en condiciones menos favorables, pero aún viables.

A continuación, se presentan los puntos seleccionados en la Tabla 9 y Tabla 10 para cada escenario. Cabe destacar que el análisis se realizó considerando velocidades medias del viento a alturas de 10 m y 50 m.

Tabla 9

Puntos Seleccionados con velocidad del viento a 10 m altura

Latitud	Longitud	mes	Velocidad media (m/s)	Velocidad ANN
-1.25	-78.25	Julio	7.58	6.76
-3.75	-78.75	Julio	5.38	4.09
-2.25	-80.25	Agosto	3.51	3.08

Nota. Coordenadas con velocidades del viento media a 10 m. Fuente: Propia.

Tabla 10

Puntos Seleccionados con velocidad del viento a 50 m altura

Latitud	Longitud	mes	Velocidad media (m/s)	Velocidad ANN
-1.25	-78.25	Julio	9.80	8.75
-3.75	-78.75	Julio	6.95	5.29
-2.25	-80.25	Agosto	4.54	3.98

Nota. Coordenadas con velocidades del viento media a 50 m. Fuente: Propia.

3. Cálculo de los Parámetros de Weibull

Antes de aplicar la distribución de Weibull, se calcularon los parámetros de forma k y de escala c. Para el parámetro de forma k, se consideró que la desviación estándar (σ) es el 20% de la velocidad media $\sigma = 0.2 \cdot vm$. El parámetro de escala se calculó con base en la velocidad media del viento.

Este supuesto es una práctica común en análisis de viento cuando no se dispone de mediciones directas de la dispersión como en ese caso que se trabaja con las velocidades media mensuales.

4.2. Aplicación de la distribución de Weibull

La distribución de Weibull permitió describir de forma precisa la variabilidad de las velocidades del viento en un lugar específico. Este modelo probabilístico se basa en dos parámetros principales, k (forma) y c (escala), que caracterizan la dispersión y la intensidad del viento respectivamente.

En este capítulo, se describe el procedimiento para estimar los parámetros de Weibull a partir de datos mensuales de velocidad del viento, seguido por la construcción de la función de densidad de probabilidad y su aplicación para analizar el potencial de generación de energía.

4.2.1. Cálculo del parámetro k

El parámetro k determino la concentración de las velocidades del viento alrededor de la media. Una vez calculada la velocidad media (*vm*) con la ecuación (1) y la desviación estándar (σ) con la ecuación (3), se determinó k utilizando ecuación (11). Este cálculo ajusto el grado de dispersión de las velocidades del viento. Un valor alto de k indica que las velocidades están más concentradas cerca de la velocidad media (vm) , mientras que un valor bajo de k refleja mayor dispersión.

Para cada ubicación, se aplicó la distribución de Weibull, la cual permite caracterizar el comportamiento de la velocidad del viento mediante los parámetros k (forma) y c (escala). Se generaron curvas de densidad de probabilidad, con un rango de velocidades de 0 a 15 m/s en intervalos de 0.1 m/s, acorde al rango operativo del generador Vortex Bladeless.

4.2.2. Cálculo del parámetro de escala (c)

El parámetro de escala (c) define la amplitud de la distribución Weibull, ajustando el rango general de las velocidades del viento. Su cálculo se llevó a cabo de la siguiente manera: Él parámetro (c) está directamente relacionado con la velocidad media (vm) y depende del parámetro de forma (k) a través de la función gamma (Γ). El parámetro (c) está diseñado para reflejar cómo las velocidades del viento están distribuidas en relación con su valor promedio (vm). Para el cálculo de parámetro de escala (c) se utilizó la ecuación (14).

La aplicación de esta distribución permitió estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes valores de velocidad del viento en cada punto de estudio.

4.2.3. Corrección usando la función gamma (Γ):

La función gamma Γ(1+1/k) se evaluó numéricamente utilizando software computacional para poder calcular para cada punto y cada mes. Por ejemplo: Si k =5.74, entonces: Γ (1+1/5.74) ≈0.965. Sustituyendo los valores en la ecuación, se obtiene el parámetro de escala (c), que indica la escala general de las velocidades del viento en el punto y mes específicos. Mediante los datos calculados se puede interpretar que un (c) más alto significa que las velocidades del viento son generalmente mayores y un (c) más bajo indica que son menores en promedio.

4.2.4. Organización de los parámetros k y c

Los valores de k y c se almacenaron en un archivo de Exel en columnas separadas para cada mes, etiquetadas como JAN_k, JAN_c, FEB_k, FEB_c, etc., junto con los datos de latitud y longitud los cálculos se realizaron para todas las coordenadas y velocidades de cada mes, los resultados para el cálculo de los puntos seleccionados se muestran en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11

Calculo de los parámetros k y c para velocidades 10 m altura

Latitud	Longitud	mes	Velocidad media (m/s)	K (forma)	c (escala)
-1.25	-78.25	Julio	7.58	5.742	8.19
-3.75	-78.75	Julio	5.38	5.742	5.81
-2.25	-80.25	Agosto	3.51	5.742	3.79

Nota. Fuente: Propia

Tabla 12

Calculo de los parámetros k y c para velocidades 50 m altura

Latitud	Longitud	mes	Velocidad media (m/s)	K (forma)	c (escala)
-1.25	-78.25	Julio	9.80	5.742	10.59
-3.75	-78.75	Julio	6.95	5.742	7.52
-2.25	-80.25	Agosto	4.54	5.742	4.91

Nota. Fuente: Propia

A partir de estas velocidades se calcularon los parámetros k (forma) y c (escala) de la distribución de Weibull, utilizados para describir la variabilidad del viento. El valor de k=5.742, obtenido considerando una desviación estándar de 0.2, refleja la consistencia del viento en las ubicaciones analizadas, mientras que c varía según la velocidad promedio mensual de cada punto, indicando el potencial energético del viento en cada sitio.

4.2.5. Calculo Distribución Weibull

Una vez determinados los parámetros k y c, se utilizó la distribución de Weibull (15), para modelar las velocidades del viento en cada punto. Se definió un rango de velocidades del viento entre 0 y 15 m/s. Con los valores de k y c correspondientes a cada punto y mes, se calculó la función de densidad de probabilidad de Weibull para las velocidades dentro de este rango como se muestra en la Tabla 13 y Tabla 14. Esto generó

una curva que describe la probabilidad relativa de que ocurra cada velocidad en el rango especificado.

Tabla 13

Calculo probabilidad de Weibull para cada coordenada a 10 m altura

Velocidad (m/s) 10m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.006281085	0.070910055	0.000877139
4	0.149821676	0.501629682	0.023102215
6	0.345664702	1.21E-05	0.135810462
8	0.008429319	1.57E-30	0.261837065
10	1.94E-09	4.47E-112	0.077321923
12	3.13E-27	1.76e-321	0.00053898
14	9.29E-67	0	3.13E-09

Nota. Fuente: Propia

Tabla 14

Calculo probabilidad de Weibull para cada coordenada a 50 m altura

Velocidad (m/s) 50m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.00019998	0.00143412	0.016482261
4	0.00533278	0.03738878	0.325726362
6	0.03523917	0.19962968	0.127330033
8	0.11734085	0.24548943	7.75E-07
10	0.2011508	0.01705253	4.54E-25
12	0.12642399	2.93E-06	1.55E-72
14	0.01423586	5.03E-15	3.74E-177

Nota. Fuente: Propia

4.2.6. Análisis Weibull

En la siguiente graficas se muestra una comparación de la probabilidad de Weibull para 10 m y 50 m donde se puede observar cómo varía de acuerdo con la velocidad. Se observa en la Figura 18 que las distribuciones de Weibull a 50 m están desplazadas hacia la derecha en comparación con las de 10 m de la Figura 17. Esto significa que, a mayor altura, el viento tiende a alcanzar velocidades más altas con mayor frecuencia. Este fenómeno se debe a la reducción del efecto de fricción con la superficie terrestre (vegetación, edificios, terreno), lo que permite que el viento fluya con mayor intensidad a alturas más elevadas.

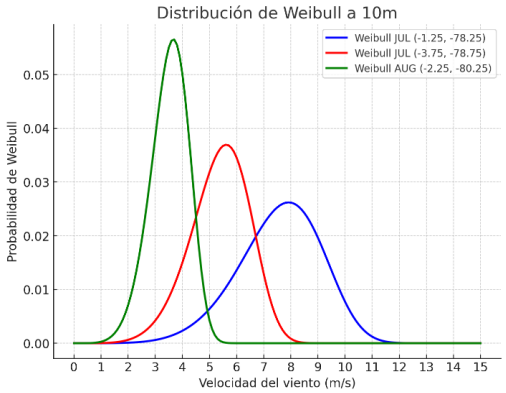


Figura 17 Distribución de Weibull 10 m. Fuente: Propia

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

A 10 m de altura, la velocidad más frecuente se encuentra en torno a los 7-8 m/s. A 50 m de altura, la curva se desplaza ligeramente hacia la derecha, sugiriendo que la velocidad media del viento aumenta con la altura como lo muestra la Figura 18. Esto sugiere un sitio con velocidades de viento moderadas y relativamente estables.

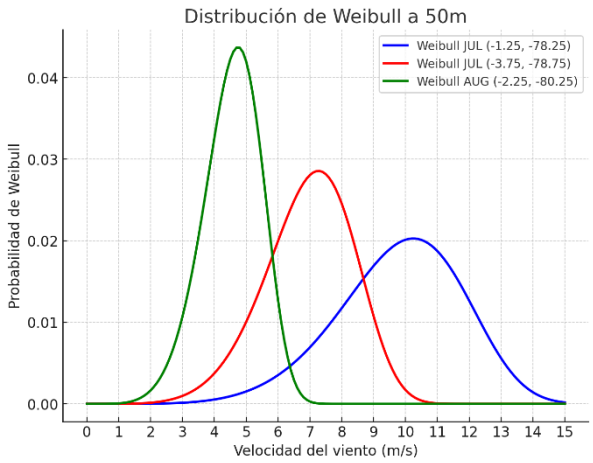


Figura 18 Distribución de Weibull 50 m Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

A 10 m de altura, el pico se sitúa alrededor de los 5-6 m/s, lo que indica un régimen de viento más bajo que en el primer punto en la Figura 17. A 50 m de altura, la curva mantiene una forma similar, pero con un pequeño desplazamiento hacia la derecha, mostrando que el viento es más intenso en altura como se muestra en la Figura 18. Esta ubicación tiene menos viento en comparación con el punto anterior.

Mes de Agosto (-2.25, -80.25)

Se muestra en la Figura 17, a 10 m de altura, la velocidad más frecuente es de aproximadamente 3-4 m/s, lo que indica un régimen de viento más débil. En la Figura 18 a 50 m de altura, hay un pequeño aumento en la velocidad, pero sigue siendo el sitio con los valores más bajos de los tres analizados.

Este sitio tiene la menor cantidad de viento, lo que puede influir negativamente en la generación de energía eólica.

4.3. Cálculo de la potencia disponible del viento

En este apartado se describe el proceso realizado para calcular la potencia disponible del viento en los puntos seleccionados y su respectiva representación gráfica. El cálculo de la potencia disponible del viento se basó en la distribución de Weibull, la cual modela la probabilidad de ocurrencia de distintas velocidades del viento.

Para este cálculo, se consideró un rango de velocidades entre 0 m/s y 15m/s, con un intervalo de 0.1 m/s, lo cual permite una curva suave y detallada. La potencia disponible del viento se calcula utilizando la ecuación (8). Para la densidad de aire se tomó el valor de ρ=1.225kg/m³ y para el área efectiva del generador Vortex Bladeless A=0.97 m², de igual manera la velocidad del viento en m/s y la probabilidad de Weibull.

En la Tabla 15 y Tabla 16 se representa los datos del cálculo realizado, la escala se encuentra representada de 0 al 15 m/s con saltos de 2, para poder optimizar el espacio en este documento.

Tabla 15

Potencia disponible del viento a 10 m altura

Velocidad (m/s) 10m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.029854	0.33703549	0.004169041
4	5.69681942	19.073967	0.878438627
6	44.3594968	0.00155086	17.42869238
8	2.56413136	4.76E-28	79.6487406
10	1.15E-06	2.65E-109	45.93888778
12	3.22E-24	1.805746e-318	0.553342268
14	1.51E-63	0	5.10E-06

Nota. Fuente: Propia

Tabla 16

Potencia disponible del viento a 50 m altura

Velocidad (m/s) 50m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.0009505	0.00681637	0.078340187
4	0.20277373	1.4216709	12.38541918
6	4.52227779	25.6186759	16.34039045
8	35.6941493	74.6759208	0.000235894
10	119.508721	10.1313368	2.70E-22
12	129.792932	0.00300415	1.59E-69
14	23.2084208	8.20E-12	6.09E-174

Nota. Fuente: Propia

4.3.1. Análisis potencia disponible del viento

Las gráficas de potencia disponible del viento a 10 m de la Figura.19 y 50 m de altura Figura.20. Permiten evaluar la cantidad de energía eólica que pudo ser convertida en electricidad mediante aerogeneradores Vortex Bladeless en distintas ubicaciones.

Se observo un incremento notable en la potencia disponible cuando se pasa de 10 m a 50 m, lo que confirma que a mayor altura el recurso eólico es más abundante.

La ubicación del mes de Julio (-1.25, -78.25) presenta el mayor incremento, alcanzando valores máximos cercanos a 14 W a 50 m como lo muestra la Figura 20, en comparación con los 9 W registrados a 10 m de la Figura 19. En general, la potencia disponible a 50 m es aproximadamente 1.5 a 2 veces mayor que a 10 m en todas las ubicaciones, lo que sugiere un aumento significativo en el potencial de generación eléctrica.

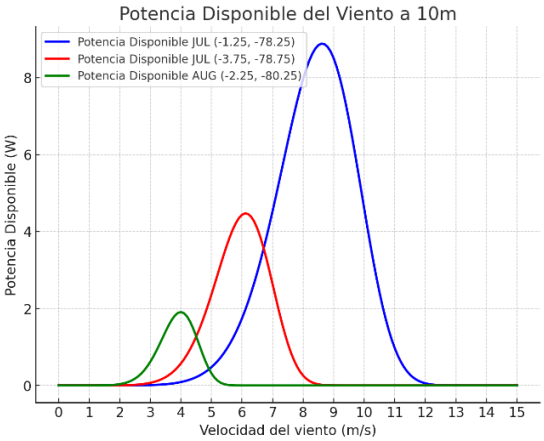


Figura 19 Potencia disponible del viento 10 m. Fuente: Propia

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

Este mes a 10 m de altura se muestra una potencia disponible del viento excelente para la generación de energía de acuerdo con la Figura 19. A 50 m se observa en la Figura 20 un aumento considerable en la potencia máxima, superando 14 W, además de un desplazamiento del pico hacia velocidades más altas.

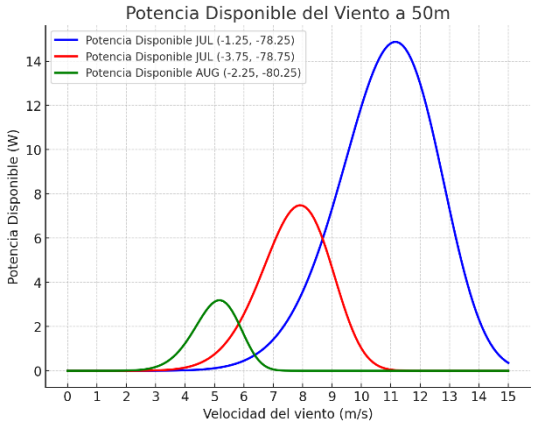


Figura 20 Potencia disponible del viento 50 m Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

En la Figura 19 se muestra que este mes a 10 m de altura presento un pico de potencia de aproximadamente de 4 W, con la distribución de Weibull concentrada entre 4 y 8 m/s. A 50 m la potencia máxima se incrementa hasta casi a 7 W, y el pico se desplaza ligeramente hacia velocidades más altas entre 6-9 m/s como se muestra en la Figura 20.

Aunque la mejora con la altura es notable, el incremento no es tan pronunciado como en el primer punto, indicando que la velocidad del viento a nivel superficial es menor aquí.

Mes de Agosto (-2.25, -80.25)

A 10 m de altura se muestra en la Figura 19 la menor potencia disponible, con un pico de alrededor de 2 W y una distribución de Weibull más concentrada en bajas velocidades de viento (2-5 m/s). A los 50 m de altura la potencia aumenta a un máximo de casi 3 W como se muestra en la Figura 20, pero el crecimiento es menos significativo en comparación con los otros puntos. La ganancia de potencia al aumentar la altura es menor aquí, sugiriendo que esta zona podría no ser la más eficiente para generación eólica. La potencia disponible del viento determina la cantidad de energía que un aerogenerador puede extraer.

En este caso, las estimaciones muestran que la altura de 50 m ofrece un potencial significativamente mayor para la conversión de energía en todas las ubicaciones, en la siguiente etapa del estudio, se estimó la energía generada (kWh/mes) y se modeló el sistema en MATLAB/Simulink para obtener estimaciones precisas del potencial eléctrico de los aerogeneradores Vortex Bladeless en cada ubicación.

4.4. Cálculo de la Potencia Generada

La potencia generada por el aerogenerador se obtuvo a partir de la potencia disponible en el viento y la eficiencia del sistema. Para ello, se determinó primero la potencia disponible en función de la velocidad del viento y la distribución de Weibull, una vez determinada la potencia disponible, se aplicó la ecuación de potencia con una eficiencia del 20% para este caso, dado que la eficiencia del aerogenerador no es del 100%, solo un porcentaje de la potencia disponible puede convertirse en electricidad. Este factor de eficiencia considera las pérdidas mecánicas, aerodinámicas y eléctricas del sistema. A continuación, se muestra la Tabla 17 y Tabla 18 con la potencia generada para cada coordenada.

Tabla 17

Potencia generada a 10 m altura

Velocidad (m/s) 10m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.00125071	0.0089562	0.101110648
4	0.26353159	1.70904583	5.72219011
6	5.22860771	13.3078491	0.000465259
8	23.8946222	0.76923941	1.43E-28
10	13.7816663	3.46E-07	7.96E-110
12	0.16600268	9.65E-25	5.41723e-319
14	1.53E-06	4.54E-64	0

Nota. Fuente: Propia

Tabla 18

Potencia generada a 50 m altura

Velocidad (m/s) 50m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.00028515	0.00204491	0.023502056
4	0.06083212	0.42650127	3.715625753
6	1.35668334	7.685602759	4.902117135
8	10.7082448	22.40277623	7.08E-05
10	35.8526162	3.039401049	8.10E-23
12	38.9378797	0.000901245	4.76E-70
14	6.96252623	2.46E-12	1.83E-174

Nota. Fuente: Propia

4.4.1. Analisis potencia generada

La potencia generada es mayor a 50 m que a 10 m en todas las ubicaciones, lo cual es esperado debido al incremento de la velocidad del viento con la altura. A pesar de que la forma de la curva es similar para ambas alturas como se muestra en la Figura 21 y Figura 22, la potencia generada aumenta significativamente a 50 m, reflejando la relación cúbica entre la velocidad del viento y la potencia. Las curvas tienen forma de campana, lo que indica que la potencia generada es máxima en un rango específico de velocidades del viento, determinado por la distribución de Weibull.

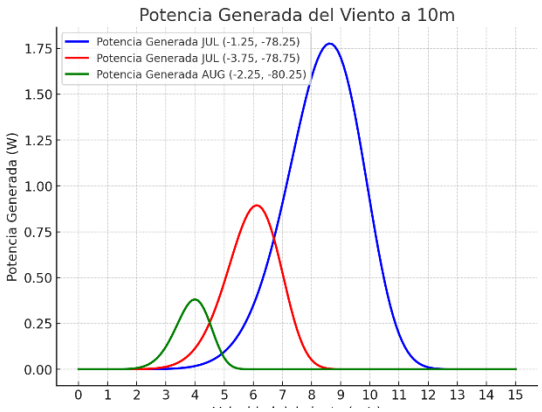


Figura 21 Potencia generada 10 m. Fuente: Propia

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

En este mes, a 10 m, de altura se observo que la mayor potencia generada entre los puntos analizados, con un pico cercano a 1.75 W alrededor de 6-9 m/s representado en la Figura 21. A 50 m se observa en la Figura 22 la potencia máxima aumenta hasta 2.5 W, y el pico se desplazó ligeramente hacia la derecha a velocidades más altas.

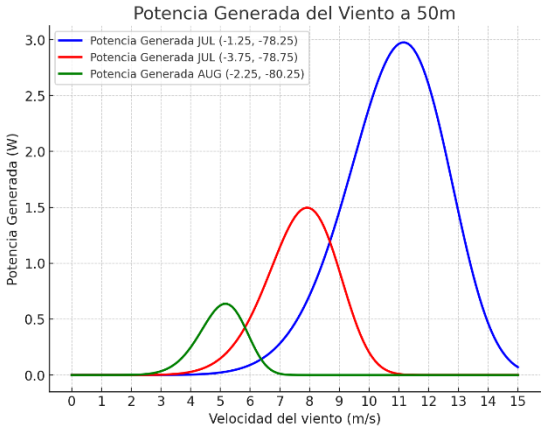


Figura 22 Potencia generada 50 m. Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

En este caso a los 10 m de altura se muestra en la Figura 21 un pico de 0.7 W en velocidades de 5-6 m/s. En la Figura 22 a 50 m la potencia máxima se incremento hasta 1.2 W, con una ligera expansión del rango de velocidades útiles. La ganancia con la altura es notable, pero no tan grande como en el primer punto.

Mes de agosto (-2.25, -80.25)

En la Figura 21 a los 10 m de altura , se registró la menor potencia generada , con un pico cercano a 0.3 W en el rango de 4-5 m/s. A 50 m la potencia aumentó hasta 0.5 W, pero la curva siguía siendo más baja en comparación con las otras ubicaciones como

se muestra en la Figura 22. Este sitio presentó menor potencial eólico, y aunque la ganancia con la altura es visible, el incremento fue tan significativo como en los otros casos. No es el mejor candidato para generación eólica eficiente.

4.5. Estimación del potencial de generación eléctrica

La energía generada por el aerogenerador se obtiene a partir de la potencia generada y el tiempo de operación del sistema. Dado que la potencia generada varía según la velocidad del viento, fue necesario calcular un valor representativo que refleje la producción de energía a lo largo de un periodo determinado.

Para ello, se considera un tiempo de operación mensual de 720 horas (30 días × 24 horas) que equivale a 1 mes. En la Tabla 19 y Tabla 20 se representan los valores calculados.

Tabla 19
Estimación de energía generada a 10 m

Velocidad (m/s) 10m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	0.00644846	0.07279967	0.000900513
4	1.23051299	4.11997688	0.189742743
6	9.58165132	0.00033499	3.764597553
8	0.55385237	1.03E-28	17.20412797
10	2.49E-07	5.73E-110	9.92279976
12	6.95E-25	3.9004e-319	0.11952193
14	3.27E-64	0	1.10E-06

Nota. Fuente: Propia

Tabla 20

Estimación de energía generada a 50 m

Velocidad (m/s) 50m	Julio (-1.25, -78.25)	Julio (-3.75, -78.75)	Agosto (-2.25, -80.25)
0	0	0	0
2	4.11E-06	0.00021115	0.027890426
4	0.023357123	1.148138018	87.13996257
6	3.442204312	110.4677556	44.94144499
8	90.46905112	395.9744235	3.95E-09
10	519.2483433	3.731723285	2.65E-45
12	354.4331001	1.90E-07	5.30E-140
14	7.136462628	8.91E-25	0

Nota. Fuente: Propia

4.5.1. Análisis de la estimación del potencial de generación eléctrica

La energía generada es mayor a 50 m que a 10 m en todas las ubicaciones, debido al incremento de la velocidad del viento con la altura. Se observa que la curva de energía generada adopta una forma de campana, lo que refleja que la mayor generación ocurre en un rango específico de velocidades del viento, determinado por la distribución de Weibull. El área bajo la curva representa la energía total generada durante un mes, como se muestra en la Figura 23 y Figura 24.

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

A la altura de 10 m se ilustra en la Figura 23 que la mayor cantidad de energía generada entre los puntos analizados es considerablemente buena, con un pico cercano a 1.2 kWh en velocidades de 6-7 m/s. A los 50 m en la Figura 24 el pico de energía generada aumenta hasta 2 kWh, con una distribución más amplia en velocidades más altas.

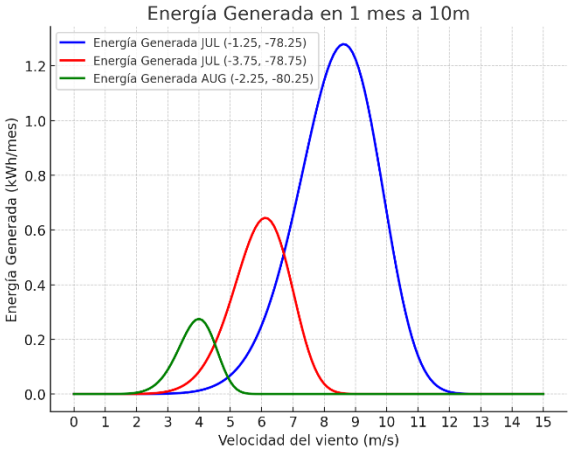


Figura 23 Energía Generada 10 m. Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

A los 10 m de alto se ve en la Figura 23 un pico de 0.6 kWh para estas velocidades instantaneas de 5-6 m/s. A 50 m en la Figura 24 la energía generada aumentó hasta 1 kWh, con una mayor amplitud en el rango de velocidades efectivas.

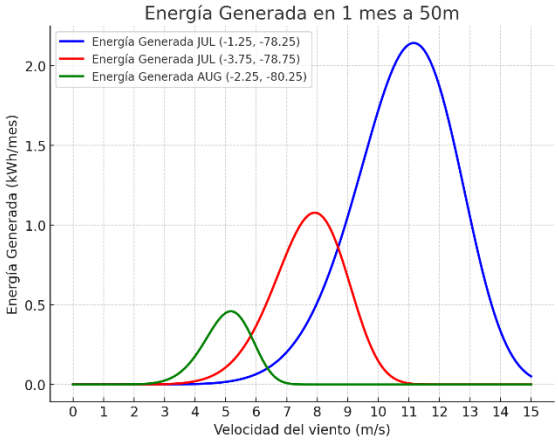


Figura 24 Energía generada 50 m Fuente: Propia

Mes de Agosto (-2.25, -80.25)

A 10 m, se registró la menor energía generada, con un pico cercano a 0.3 kWh en el rango de 3-5 m/s como se muestra en la Figura 23. A 50 m de alto el pico se incrementó a 0.4 kWh como se muestra en la Figura 24, pero la curva sigue siendo más baja que en las otras ubicaciones.

Este sitio presentó menor potencial eólico, y aunque la ganancia con la altura es visible, el incremento no es tan significativo.

4.6. Simulación en MATLAB y Simulink

El modelo implementado en Simulink permitió estimar la potencia disponible, la potencia generada y la energía eléctrica producida por un aerogenerador Vortex Bladeless en función de la velocidad del viento y la distribución de Weibull, el diagrama del modelo se muestra en la Figura 25.

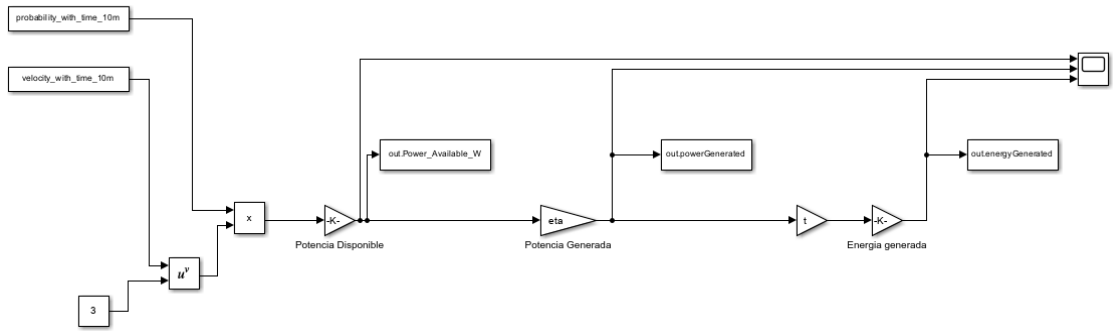


Figura 25 Estructura del modelo en Simulink. Fuente: Propia

El modelo está compuesto por los siguientes bloques principales:

4.6.1. Entrada de Datos

El modelo requiere la entrada de datos, los cuales son enviados por MATLAB, el cual lee el archivo de Excel que contiene las coordenadas y la distribución de Weibull ya calculada para cada punto y mes, con sus correspondientes alturas de 10 m y 50 m de altura. Para ello, se definieron las siguientes variables en los bloques de Simulink como se muestra la Figura 26. Las variables para la entrada de datos son las siguientes:

- **velocity_with_time_10m**: Contiene los valores de velocidad del viento en función del tiempo, generados a partir de la distribución de Weibull a 10 m de altura.
- **probability_with_time_10m**: Representa la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad del viento a lo largo del tiempo.

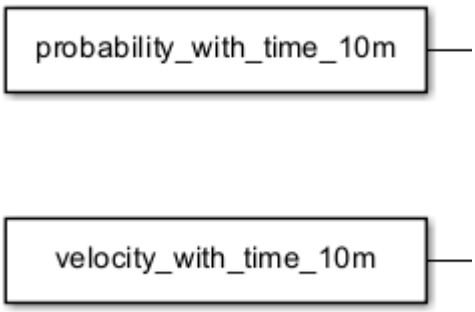


Figura 26 Entrada de datos. Fuente: Propia

4.6.2. Cálculo de la Potencia Disponible

Se utilizó la ecuación de potencia del viento, para lo cual se creó el bloque u^3 que eleva al cubo la velocidad del viento.

El bloque K representa el coeficiente que incluye la densidad del aire (ρ) y el área barrida del aerogenerador (A). La salida **outPower_Available_W** almacena la potencia disponible en vatios (W), como se muestra en la Figura 27.

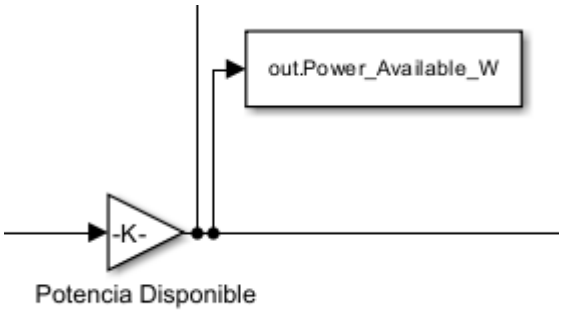


Figura 27 bloque Potencia disponible. Fuente: Propia

4.6.3. Cálculo de la Potencia Generada

Se introduce un factor de eficiencia (η) para considerar las pérdidas aerodinámicas y mecánicas del sistema.

La salida **outPowerGenerated** almacena la potencia eléctrica real que el aerogenerador puede producir, en la Figura 28 se representan los bloques usados.

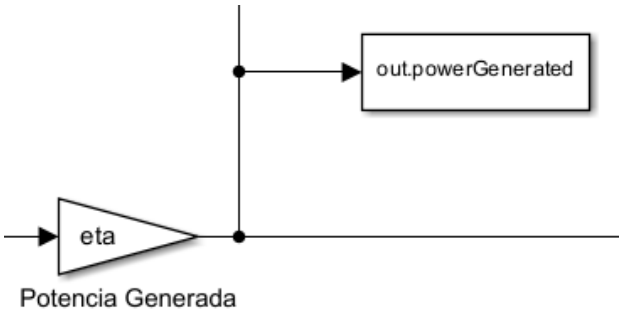


Figura 28 Bloque potencia generada. Fuente: Propia

4.6.4. Cálculo de la Energía Generada

En los bloques de la Figura 29 se integró la potencia generada en el tiempo para obtener la energía total. El bloque t representa el tiempo de operación del aerogenerador. La salida **outEnergyGenerated** almacena la energía generada en (kWh).

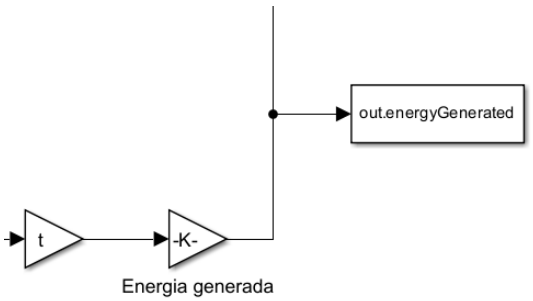


Figura 29 Bloque energía generada. Fuente: Propia

4.6.5. Visualización de Resultados

Los valores de potencia disponible, potencia y energía generadas se envían a un bloque de visualización (scope) Figura 30, lo que permite analizar su comportamiento en función de la velocidad del viento.

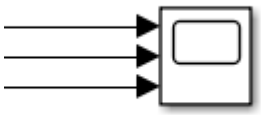


Figura 30 Bloque de visualización. Fuente: Propia

4.7. Preprocesamiento de datos y Cálculo en MATLAB

Antes de ejecutar la simulación en Simulink, se procesaron los datos de velocidad del viento y la distribución de Weibull. Para ello, se desarrolló un script en MATLAB que se encarga de:

- Leer y filtrar datos de velocidad del viento.
- Calcular la potencia disponible y la potencia generada.
- Estimar la energía mensual en kWh.
- Formatear los datos para su uso en Simulink.

El código en MATLAB se divide en tres etapas principales:

- Lectura y selección de datos desde un archivo CSV.
- Cálculo de potencia y energía generada utilizando ecuaciones físicas.
- Preparación de variables para Simulink y exportación de datos

4.7.1. Lectura de Datos desde un archivo CSV

El código leer un archivo CSV que contiene datos de velocidad del viento y parámetros de Weibull:

```
% Ruta del archivo Excel (Datos de 10M) - Asegurar extensión correcta
filePath = 'D:\TRABAJO_GRADO\Analisis Datos WS\Datos Viento 10M\XTRAPOLADOS\Tablas.csv';
```

Luego, se identifican las coordenadas únicas disponibles en el dataset y se presentan al usuario para su selección.

```
% Obtener coordenadas únicas
unique_coords = unique(data(:, {'LAT', 'LON'}));

% Mostrar coordenadas disponibles
disp('Lista de coordenadas disponibles:');
disp(unique_coords);
```

El usuario ingresa una latitud, longitud y mes, que son utilizados para filtrar los datos

```
% Solicitar al usuario un punto y mes específico
LAT = input('Ingrese la LAT de la lista mostrada: ');
LON = input('Ingrese la LON de la lista mostrada: ');
Month_es = input('Ingrese el mes en español (Ejemplo: Julio): ', 's');
```

4.7.2. Filtrado de Datos y Normalización

Se aplica un filtro de tolerancia en la latitud y longitud para encontrar datos cercanos a la ubicación seleccionada:

```
% Manejo de tolerancia en LAT y LON
tolerancia = 0.01;
filteredData = data(abs(data.LAT - LAT) < tolerancia & abs(data.LON - LON) < tolerancia & strcmp(data.Month, Month), :);
```

Si no hay datos disponibles, se muestra un mensaje de error y el código se detiene.

```
% Extraer velocidades y probabilidades de Weibull sin repeticiones
velocity = filteredData.("Velocity (m/s)");
probability = filteredData.("Weibull_Probability");

% Normalizar la distribución de Weibull
probability = probability / sum(probability);
```

La distribución de Weibull es normalizada para asegurar que la suma de las probabilidades sea igual a 1.

En esta línea se hace el cálculo para la potencia disponible del viento, para la potencia generada y para la estimación de energía generada.

4.7.3. Cálculo de Potencia y Energía Genera

```
% Calcular potencia disponible y generada ponderando por Weibull
power_available = 0.5 * rho * A .* (velocity .^ 3) .* probability;
power_generated = eta * power_available;
energy_generated = sum(power_generated) * t / 1000; % Energía total en kWh
```

Los resultados son mostrados en consola:

```
% Imprimir resultados
fprintf('\n-----------------------------------------------------\n');
fprintf('Resultados para LAT = %.2f, LON = %.2f, MES = %s\n', LAT, LON, Month_es);
fprintf('Potencia disponible promedio del viento: %.2f W\n', sum(power_available));
fprintf('Potencia generada promedio: %.2f W\n', sum(power_generated));
fprintf('Energía generada en el mes: %.2f kWh\n', energy_generated);
fprintf('-----------------------------------------------------\n');
```

4.7.4. Preparación de Datos para Simulink

Antes de enviar los datos a Simulink, se eliminan valores repetidos y se genera un vector de tiempo:

Los datos se formatean en matrices con tiempo:

```
% Eliminar valores repetidos
[velocity_unique, idx] = unique(velocity, 'stable');
probability_unique = probability(idx);


% Formatear matrices para Simulink
velocity_with_time_10m = [time(:), velocity_unique(:)];
probability_with_time_10m = [time(:), probability_unique(:)];
```

Finalmente, se envían al espacio de trabajo de MATLAB para ser utilizados en Simulink.

```
% Asignar datos al espacio de trabajo para Simulink
assignin('base', 'velocity_with_time_10m', velocity_with_time_10m);
assignin('base', 'probability_with_time_10m', probability_with_time_10m);
```

4.7.5. Relación Matlab y Simulink

El código en MATLAB prepara las entradas necesarias para Simulink, asegurando que la simulación tenga datos de velocidad del viento y probabilidad de Weibull. Los datos generados por el código son utilizados en los siguientes bloques del modelo en Simulink como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21

Relación del código de Matlab con Simulink

Cálculo en MATLAB	Bloque en Simulink	Propósito
velocity_with_time_10m	Entrada de velocidad	Proporciona los valores de viento con el tiempo.
probability_with_time_10m	Entrada de Weibull	Define la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad del viento.
constValue (0.5 * ρ * A)	Bloque de Potencia Disponible	Calcula la potencia cinética del viento disponible.
eta (Eficiencia del sistema)	Bloque de Potencia Generada	Aplica la eficiencia del aerogenerador al cálculo de la potencia generada.
t (720h, equivalente a 30 días)	Bloque de Energía Generada	Integra la potencia generada en el tiempo para obtener la energía mensual en kWh.

Nota. Fuente: Propia

4.8. Analisis de la simulación en MATLAB y Simulink

Las simulaciones en Simulink han permitido evaluar el comportamiento de la potencia disponible, la potencia y la energía generadas, considerando las distribuciones de Weibull y los parámetros del aerogenerador Vortex Bladeless. A pesar de que la distribución de Weibull se mantiene similar a la obtenida en MATLAB, se han incorporado factores que afectan la generación real de energía, como la eficiencia aerodinámica y mecánica del sistema.

4.8.1. Simulaciones con velocidades de viento a 10 m de altura

Simulación de Julio (-1.25, -78.25) 10 m

La potencia disponible del viento en la Figura 31 alcanza su pico alrededor de 8 y 9 m/s, lo que indica una buena velocidad del viento en esta ubicación. La potencia generada sigue la tendencia de la potencia disponible, pero con valores reducidos debido a la eficiencia del aerogenerador.

La energía generada es la más baja de las tres curvas, reflejando la conversión final de la potencia en electricidad.

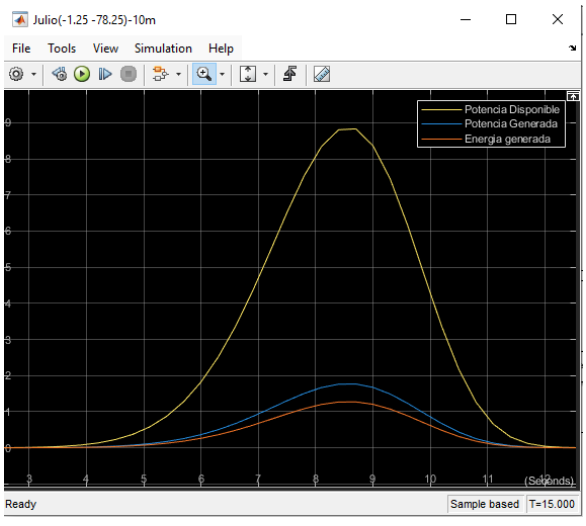


Figura 31 Simulación Julio (-1.25 -78.25). Fuente: Propia

Simulación de Julio (-3.75, -78.75) 10 m

En la Figura 32 la potencia disponible es menor que en la primera ubicación, con un pico alrededor de 6 m/s, lo que sugiere velocidades de viento más bajas.

La potencia generada presenta una curva similar, pero con menor magnitud debido a la conversión energética limitada. La energía generada mantiene la misma forma, con valores bajos en comparación con la primera gráfica.

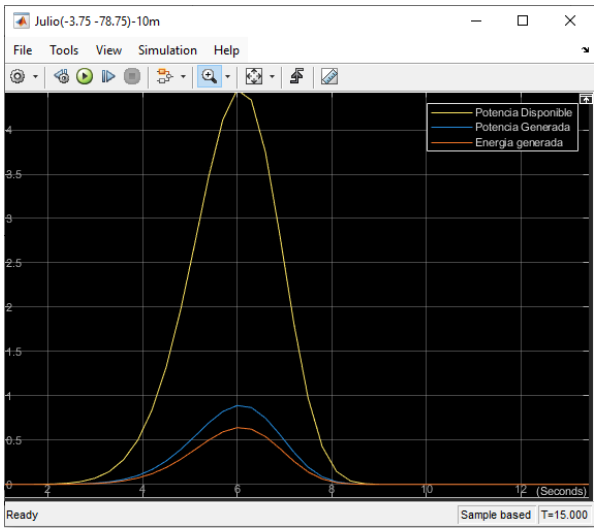


Figura 32 Simulación Julio (-3.75 -78.75). Fuente: Propia

Simulación de Agosto (-2.25, -80.25) 10 m

La potencia disponible en la Figura 33 es la más baja de todas, con un pico cerca de 4 m/s, lo que indica un recurso eólico limitado.

La potencia generada muestra valores reducidos, reflejando el bajo potencial de conversión de energía en esta ubicación.

La energía generada es casi imperceptible en comparación con las otras ubicaciones, evidenciando una baja producción energética.

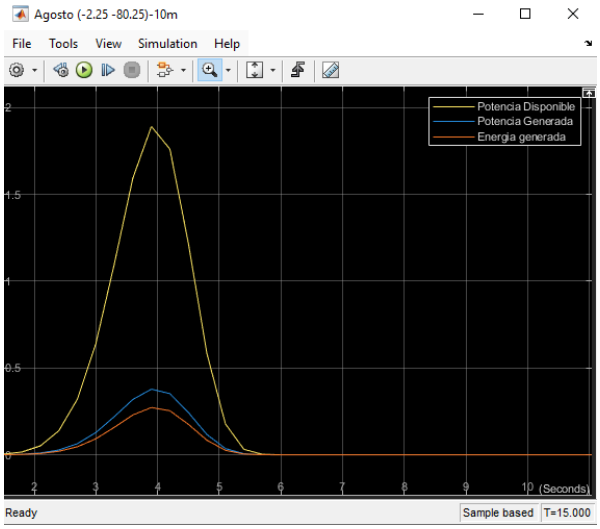


Figura 33 Simulación Agosto (-2.25 -80.25), Fuente: Propia

4.8.2. Simulaciones con velocidades de viento a 50 m de altura

Simulación de Julio (-1.25, -78.25) 50 m

La potencia disponible (amarillo) es más alta que en 10 m, alcanzando su pico cerca de 12 m/s, lo que indica un mayor potencial eólico a esta altura como se muestra en la Figura 34.

La potencia generada (azul) sigue la misma tendencia, con un incremento en comparación con la simulación a 10 m.

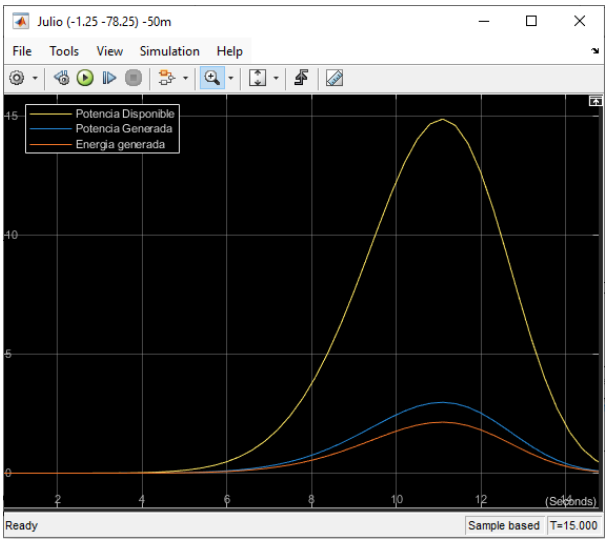


Figura 34 Simulación Julio (-1.25 -78.25) -50 m, Fuente: Propia

La energía generada (naranja) es mayor y refleja el impacto positivo de una mayor altura en la eficiencia del aerogenerador.

Simulación de Julio (-3.75, -78.75) 50 m

La potencia disponible tiene un pico más alto en comparación con la simulación a 10 m, alcanzando su máximo alrededor de 8 m/s como se muestra en la Figura 35.

La potencia generada muestra un incremento, aunque sigue siendo considerablemente menor que en la primera ubicación. La energía generada sigue una tendencia similar, pero con valores más altos debido a la mayor velocidad del viento a 50 m.

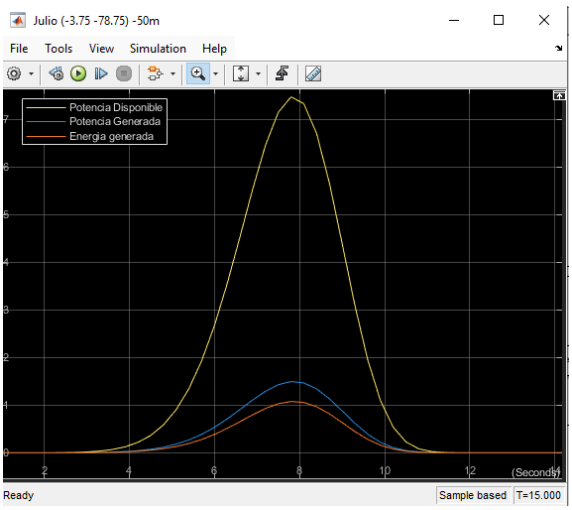


Figura 35 Simulación Julio (-3.75 -78.75)-50 m, Fuente: Propia

Simulación de Agosto (-2.25, -80.25) - 50m

La potencia disponible es mayor que a 10 m, pero sigue siendo la más baja entre las ubicaciones analizadas, con un pico cerca de 6 m/s.

La potencia y la energía generadas muestran un leve aumento en la Figura 36, aunque siguen siendo reducidas en comparación con las otras ubicaciones.

La simulación confirma que, aunque la altura mejora la eficiencia, esta ubicación sigue teniendo bajo potencial eólico.

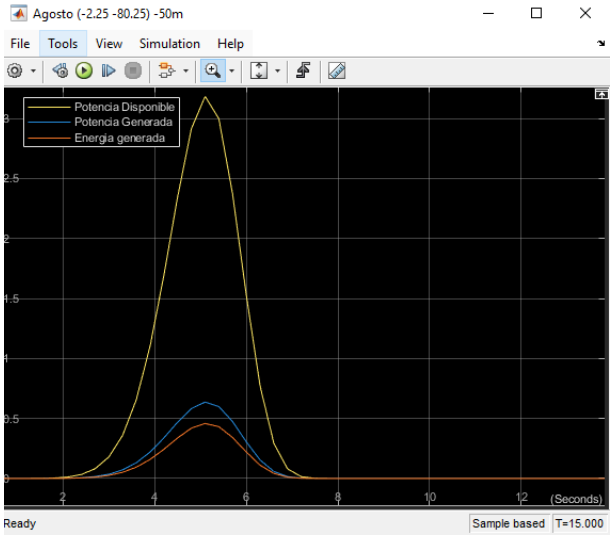


Figura 36 Simulación Agosto (-2.25 -80.25)-50 m. Fuente: Propia

4.9. FEMM

Para analizar el comportamiento electromagnético del aerogenerador Vortex Bladeless, se utilizó el software Finite Element Method Magnetics (FEMM). Este software permite modelar y evaluar la distribución del flujo magnético, la interacción de los imanes y los parámetros eléctricos dentro del generador.

El modelado en FEMM es crucial para entender cómo se comportan los campos magnéticos dentro del sistema y cómo afectan la generación de energía. A través de esta simulación, se pueden visualizar los efectos de los materiales utilizados y optimizar el diseño del generador.

4.9.1. Etapas del Modelado en FEMM definición de la Geometría y Materiales

El diseño del generador se modeló en un entorno 2D planar, en el cual se definieron las siguientes regiones y materiales:

- N40: Representando los imanes permanentes del generador.
- Hierro Puro: Material utilizado en el núcleo para mejorar la conducción magnética.
- Bobinado de 28 AWG: Definido como el arrollamiento del sistema eléctrico.
- Aire y Plástico: Representando el medio circundante y la estructura del generador.

En esta etapa, se estableció la disposición de los imanes, núcleo y bobinas, asegurando una configuración adecuada para la conversión de energía electromagnética en energía eléctrica, como se muestra en la Figura 37.

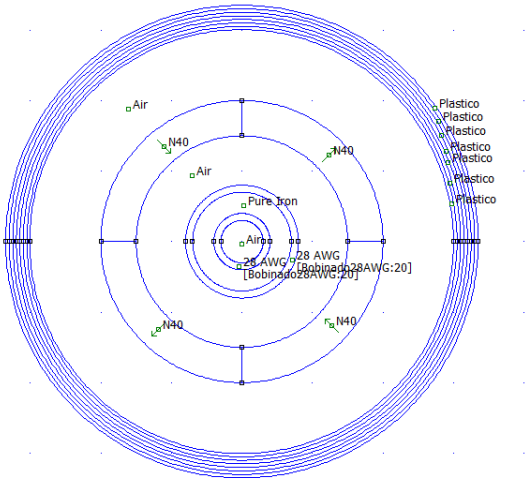


Figura 37 Modelado de imanes generador Vortex Bladeless. Fuente: Propia

4.9.2. Generación de la Malla de Elementos Finitos

Para obtener una simulación precisa, se generó una malla con 111,851 nodos y 222,242 elementos finitos. Este proceso discretiza la geometría en pequeñas regiones para resolver las ecuaciones electromagnéticas de manera más eficiente.

La creación de una malla con una alta densidad de nodos permitió obtener una mayor resolución en los resultados y minimizar los errores en la simulación del campo magnético como se muestra en la Figura 38.

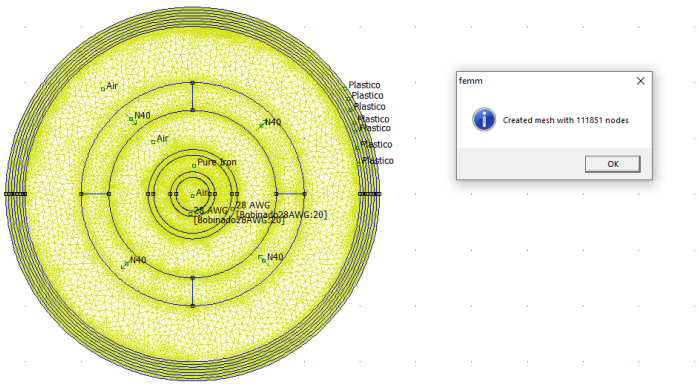


Figura 38 Mallado generador Vortex bladeless. Fuente: Propia

4.9.3. Análisis del Campo Magnético

A partir de la malla generada, se realizó la simulación para visualizar la distribución del flujo magnético dentro del generador. Se obtuvieron mapas de líneas de campo y curvas de densidad del flujo magnético, representadas en Tesla (T) como se muestra en la Figura 39.

Los resultados muestran cómo el campo magnético se distribuye alrededor de los imanes permanentes y el núcleo del generador. Las líneas de flujo indican la trayectoria del campo magnético y permiten evaluar la eficiencia del diseño.

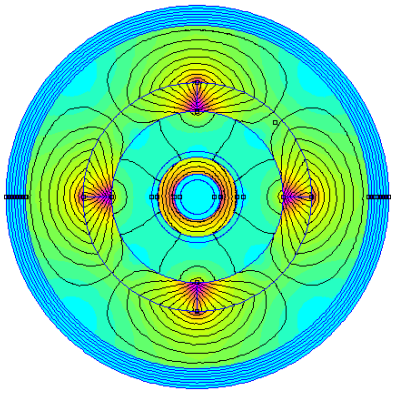


Figura 39 Campo magnético. Fuente: Propia

4.9.4. Cálculo de Parámetros Eléctricos

Se realizó un análisis eléctrico del bobinado de 28 AWG, obteniendo los siguientes valores:

- Corriente total: 2 A.
- Caída de voltaje en la bobina: 0.43275 V.
- Flujo magnético acoplado: 0.0275718 Webers.
- Inductancia calculada: 0.0137589 Henrios.
- Resistencia interna: 0.216187 Ohmios.
- Potencia generada: 0.864749 W.

Estos resultados permiten evaluar la eficiencia de conversión de energía y el desempeño del generador en condiciones ideales.

4.10. Discusión de Resultados

4.10.1. Resultados de las gráficas de 10 m y 50 m de altura

4.10.2. Graficas comparativas a 10 m de altura

Las gráficas muestran la relación entre la potencia disponible del viento, la potencia generada y la energía generada en cada ubicación a 10 m de altura. Este análisis permitió observar cómo la energía del viento se transforma en electricidad considerando las restricciones teóricas y prácticas del sistema.

Según el principio del Teorema de Betz, un aerogenerador no puede extraer más del 59.3% (Cp = 0.593) de la energía contenida en el viento. En la realidad, los aerogeneradores tienen pérdidas mecánicas, aerodinámicas y eléctricas, lo que reduce aún más la potencia transformada en energía eléctrica. Diferencia entre potencia disponible, potencia generada y energía generada.La potencia disponible representa la cantidad total de energía cinética del viento en un área determinada. La potencia generada es la fracción de la potencia disponible que el aerogenerador puede convertir en electricidad considerando el límite de Betz y la eficiencia del sistema. La energía generada (kWh) es el resultado de integrar la potencia generada en el tiempo, representando la producción energética mensual en cada ubicación.

Mes de julio (-1.25, -78.25)

En la Figura 40 se muestra que la mayor contribución ocurre en velocidades de 6-7 m/s, donde la distribución de Weibull es más alta. La potencia disponible alcanza valores cercanos a 8 W en el pico. La energía generada alcanza 1.5 W en el pico.

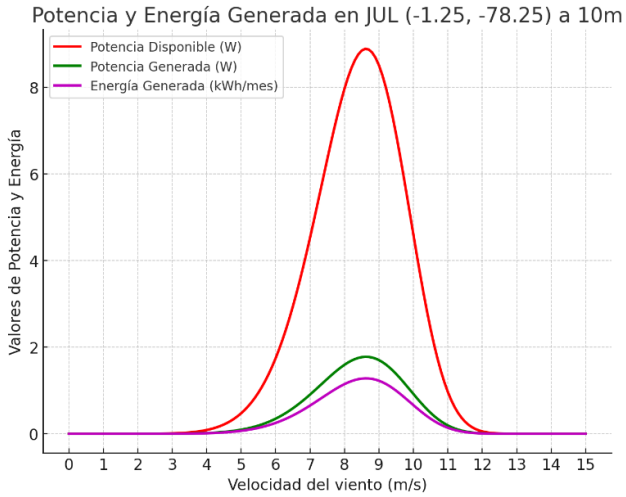


Figura 40 Comparación potencia y energía Julio (-1.25 -78.25). Fuente: Propia

Mes de julio (-3.75, -78.75)

A los 10 m de altura en la Figura 41 la mayor generación ocurre en velocidades de 5-6 m/s. La potencia disponible alcanza 5 W en el pico, mientras que la energía generada se mantiene por debajo de 0.5 W.

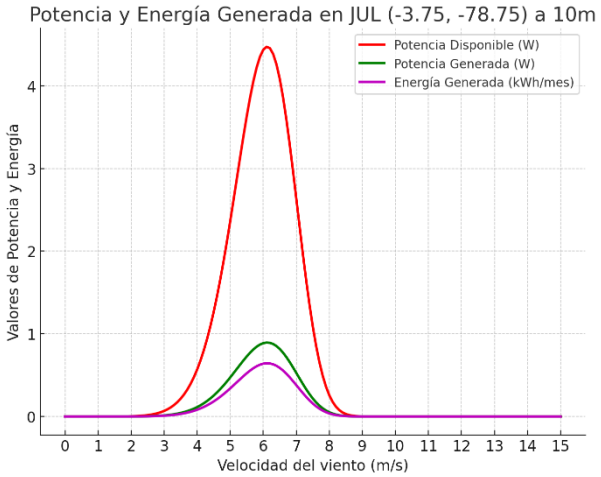


Figura 41 Comparación potencia y energía Julio (-3.75 -78.75). Fuente: Propia

Mes de Agosto(-2.25, -80.25)

A la altura de 10 m Figura 42 la mayor generación ocurre en velocidades de 4 m/s, reflejando un menor recurso eólico en esta ubicación. La potencia disponible apenas alcanza 2 W en el pico. La energía generada es muy baja, con un máximo de 0.25 W.

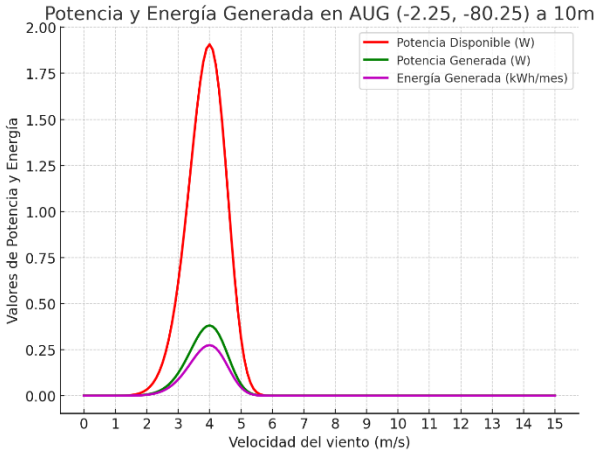


Figura 42 Comparación potencia y energía Agosto (-2.25 -80.25). Fuente: Propia

4.10.3. Graficas comparativas 50 m altura

Las gráficas muestran la relación entre la potencia disponible del viento la potencia generada y la energía generada en cada ubicación a 50 m de altura. En comparación con 10 m de altura, la energía generada mensual (kWh) casi se duplica, reflejando el impacto positivo del incremento de la velocidad del viento en la conversión de energía.

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

En la Figura 43 se ve un desplazamiento del pico hacia velocidades más altas (8-9 m/s).La potencia disponible se incrementa hasta 14 W en el pico.La energía generada también es mayor, alcanzando 2 W en su punto más alto.

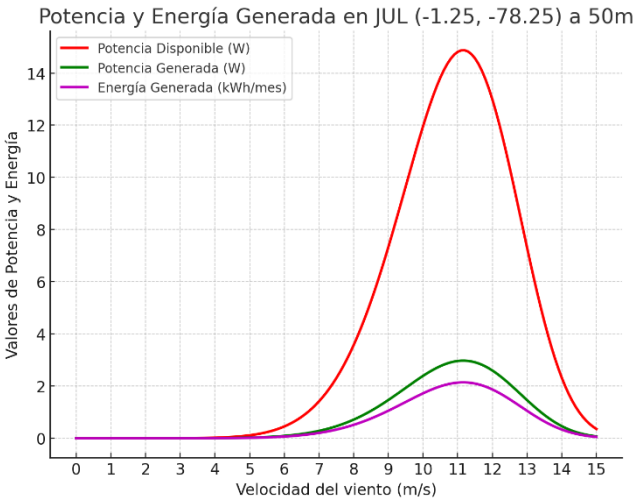


Figura 43 Comparación potencia y energía Julio (-1.25 -78.25). Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

En la Figura 44 se ve un aumento en la generación total, con el pico de energía alcanzando 1 W. La potencia disponible aumenta hasta 7 W en su punto más alto. Este sitio también se beneficia del aumento de altura, aunque no de manera tan significativa como el primer punto. Las velocidades del viento en esta ubicación son menores en comparación con el punto (-1.25, -78.25).

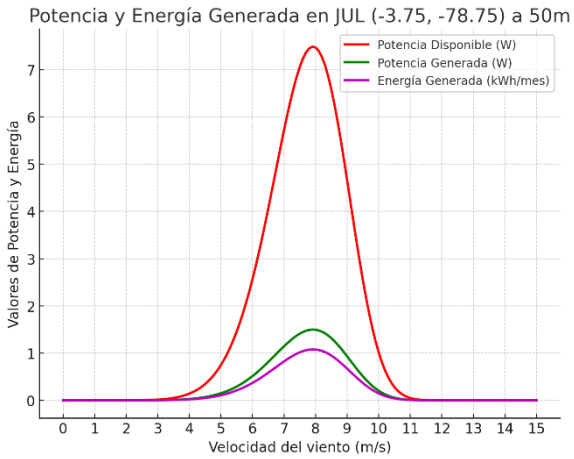


Figura 44 Comparación potencia y energía Julio (-3.75 -78.75). Fuente: Propia

Mes de Agosto (-2.25, -80.25)

Se observa un incremento en la potencia y energía generada en la Figura 45, la mejora no es tan significativa como en los otros dos puntos anteriores. La energía generada alcanzó un máximo de 0.5 W en el pico. Este sitio tiene menor potencial eólico y, aunque la generación mejoró con la altura, el aumento no es suficiente para considerarlo una ubicación óptima para generación eólica.

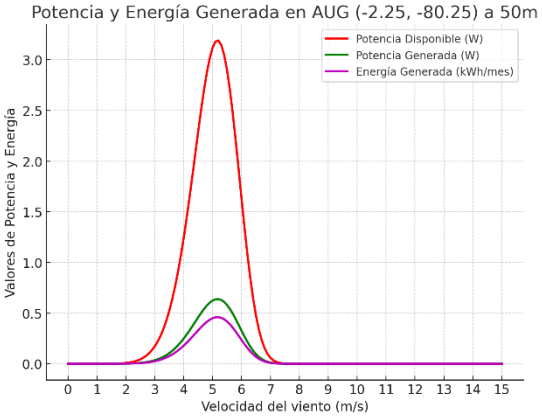


Figura 45 Comparación potencia y energía Agosto (-2.25 -80.25). Fuente: Propia

4.10.4. Graficas comparativas 10 m y 50 m altura

Mes de Julio (-1.25, -78.25)

En la Figura 46 se observa que este sitio tiene un alto potencial eólico y se beneficia considerablemente al aumentar la altura. El desplazamiento del pico hacia velocidades más altas a 50 m sugiere, que los vientos en esta zona tienen mayor estabilidad y fuerza a mayor altura, lo que hace que los aerogeneradores sean mucho más eficientes si se ubican a 50 m en lugar de 10 m.

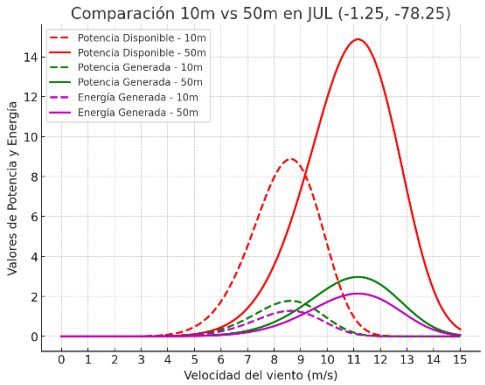


Figura 46 Comparación 10 m y 50 m Julio (-1.25 -78.25). Fuente: Propia

Mes de Julio (-3.75, -78.75)

Aunque el aumento de altura mejora la generación de energía, el beneficio no es tan marcado como en el primer punto. El recurso eólico en esta ubicación no es tan fuerte,lo que indica que aunque la altura mejora la generación, esta no alcanza los niveles óptimos observados en Julio (-1.25, -78.25) como se muestra en la Figura 47.

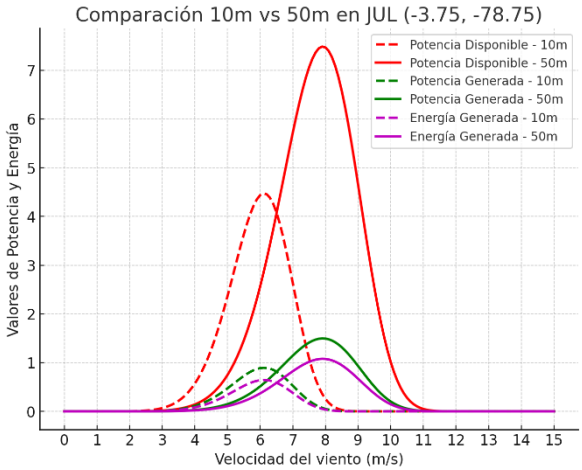


Figura 47 Comparación 10 m y 50 m Julio (-3.75 -78.75). Fuente: Propia

Mes de Agosto(-2.25, -80.25)

Este sitio no tiene un buen recurso eólico como se muestra en la Figura 48 , y aunque el incremento de altura mejora la generación, los valores siguen siendo muy bajos en comparación con las otras ubicaciones. Las velocidades del viento no son suficientemente altas ni frecuentes para generar una cantidad de energía significativa para los generadores Vortex Bladeless.

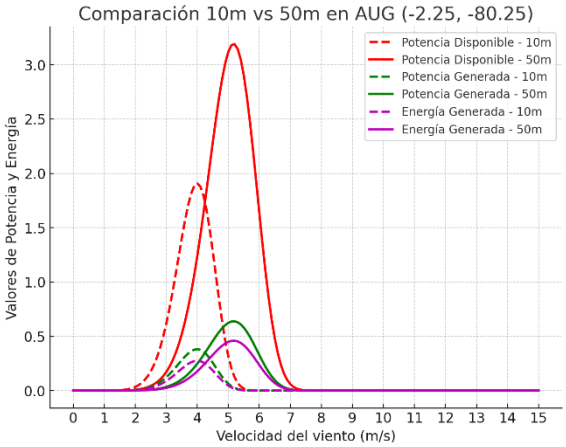


Figura 48 Comparación 10 m y 50 m Agosto (-2.25 -80.25). Fuente: Propia

En la Figura 49 se muestra que, a 50 m, todas las curvas están por encima de las graficas de 10 m, lo que confirma que lapotencia disponible aumenta con la altura debido a la mayor velocidad del viento.

El pico de cada curva a 50 m se desplaza hacia velocidades más altas, lo que indica que los vientos dominantes a esa altura son más intensos y sostenidos. Julio (-1.25, -78.25) muestra el mayor aumento de potencia con la altura, destacándosecomo la mejor opción para generación eólica. En Agosto (-2.25, -80.25) tiene la menor diferencia entre 10m y 50m, lo que sugiere que el aumento de altura no es tan efectivo en esta ubicación.

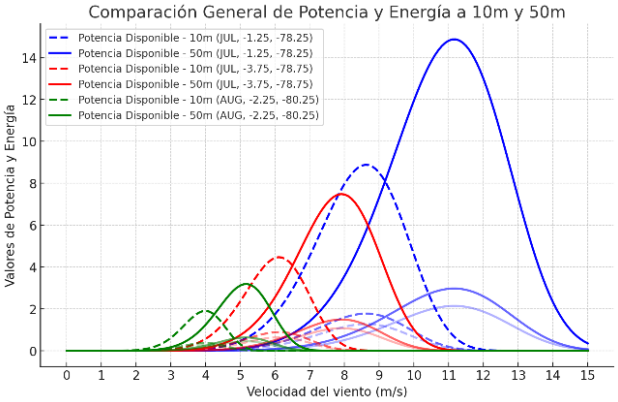


Figura 49 Comparación de todos los puntos 10 m y 50 m de altura. Fuente: Propia

Gráficas mensuales 10 m altura

Para el punto (-1.25,-78.25) en la Figura 50 se muestra que el mes de julio tiene una mayor generacion de energia en todo el año.

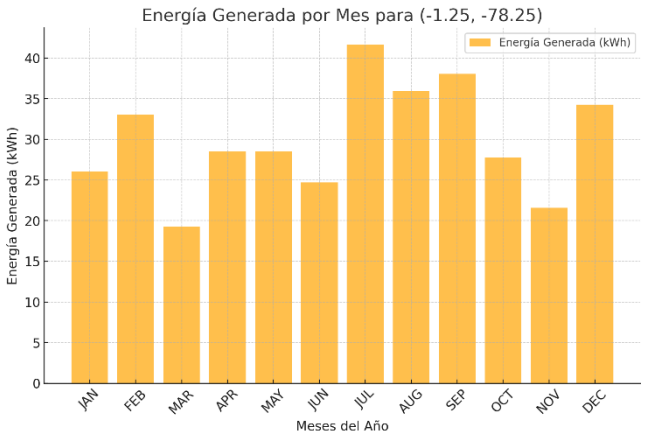


Figura 50 Energía generada por mes para (-1.25,-78.25) 10 m. Fuente: Propia

En la Figura 51 para el punto (-3.75,-78.25) se puede observar que el mes de julio tiene una mayor generacion de energia en todo el año seguido de septiembre.

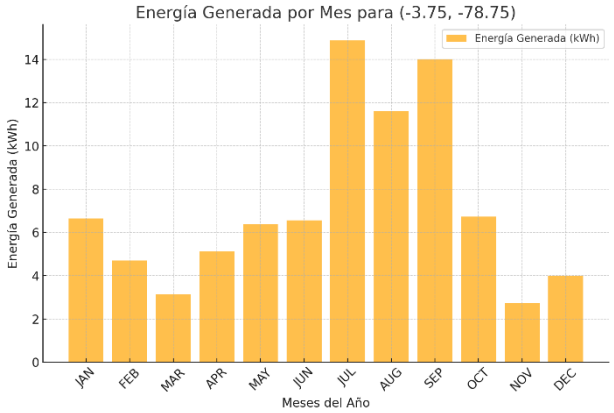


Figura 51 Energía generada por mes para (-3.75,-78.25) 10 m. Fuente: Propia

Para el punto (-2.25,-80.25) en la Figura 52 se puede observar que el mes de agosto tiene una mayor generacion de energia en todo el año seguido de diciembre y septiembre.

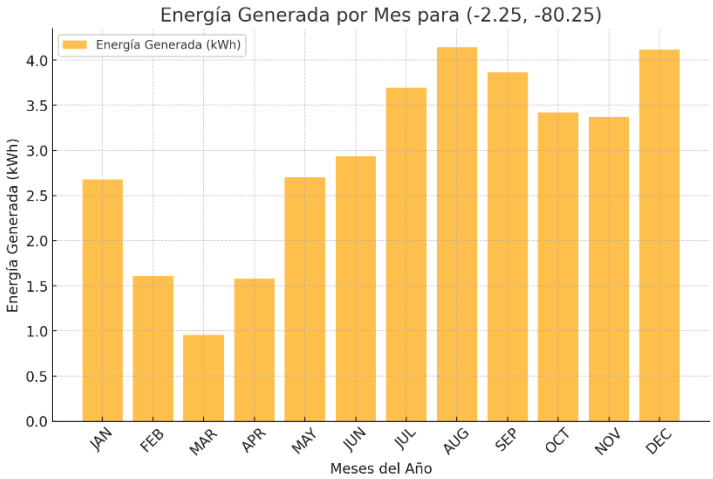


Figura 52 Energía generada por mes para (-2.25,-80.25) 10 m. Fuente: Propia

A continuación se representa la potencia disponible del viento, la potencia generada y la energía que es convertida a lo largo de 1 año para la altura de 10 m .

Para el punto (-1.25,-78.25) en la Figura 53 se puede observar la tendencia de la disponivilidad del viento en cada mes ,este punto genera mas energia como se observa en la grafica.

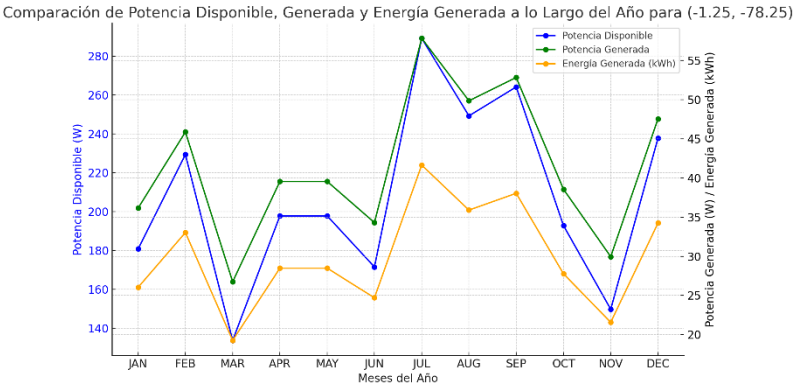


Figura 53 Potencia disponible, generada y energía generada para (-1.25,-78.25) 10 m. Fuente: Propia

En la Figura 54 para el punto (-3.75,-78.25) se oberva que la energia que se genera es mucho menor que el anterio punto (-1.25,-78.25) pero es considerablemente buena.

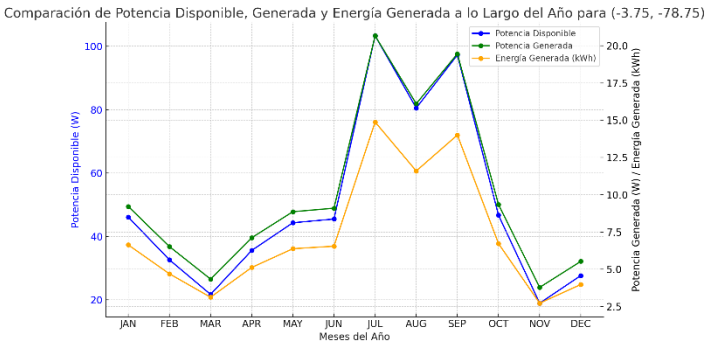


Figura 54 Potencia disponible, generada y energía generada para (-3.75,-78.25) 10 m. Fuente: Propia

Para el punto (-2.25,-80.25) la Figura 55 representa que es la ubicación donde se genera menos energia a lo largo del año.

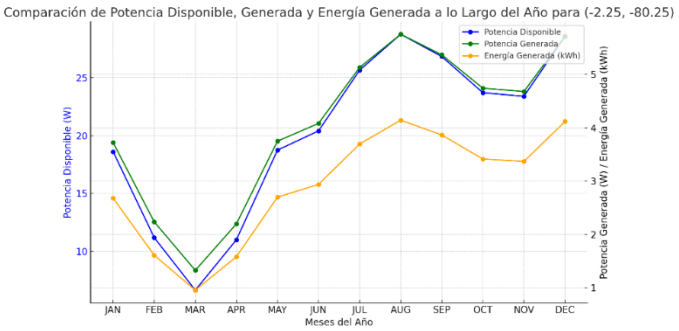


Figura 55 Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 10 m. Fuente: Propia

Gráficas anuales 50 m altura

Para la altura de 50 m se nota considerablemente el aumento de la generacion de energia.El primer punto (-1.25, -78.25) tiene una energía generada significativamente mayor durante el año, especialmente en julio como se muestra en la Figura 56.

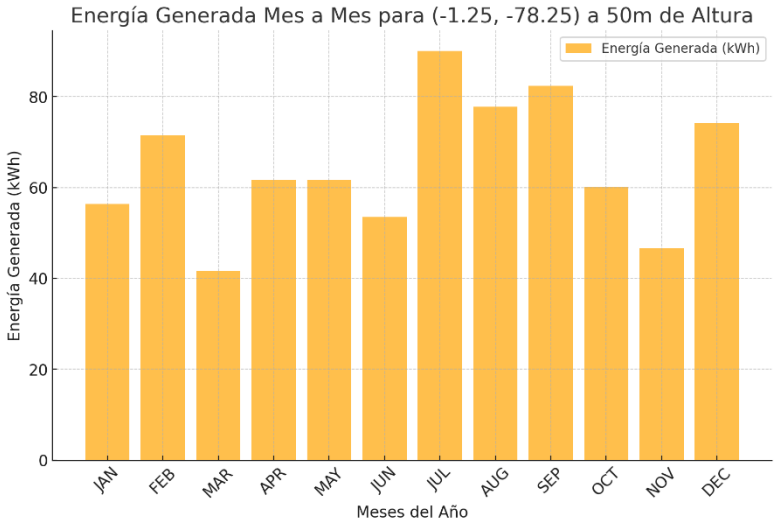


Figura 56 Energía generada por mes para (-1.25,-78.25) 50 m. Fuente: Propia

El punto (-3.75, -78.75) tiene una mayor generación a de energía a 50 m de altura comparada con la altura de 10 m , en meses como julio y agosto, la energía generada es notable como se muestra en la Figura 57.

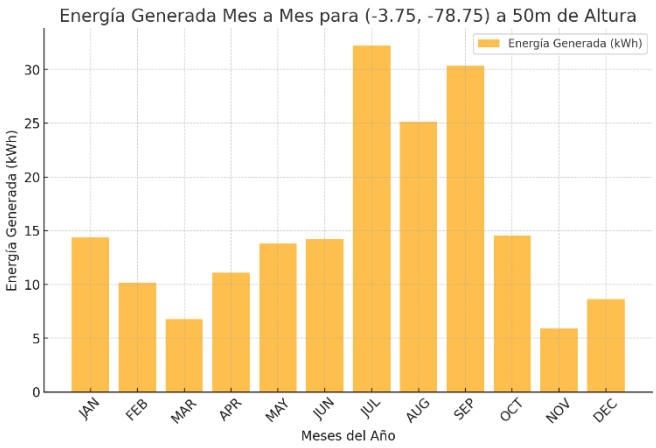


Figura 57 Energía generada por mes para (-3.75,-78.25) 50 m. Fuente: Propia

En la Figura 58, el tercer punto (-2.25, -80.25) muestra energía generada mucho más baja, lo que indica condiciones de viento menos favorables.

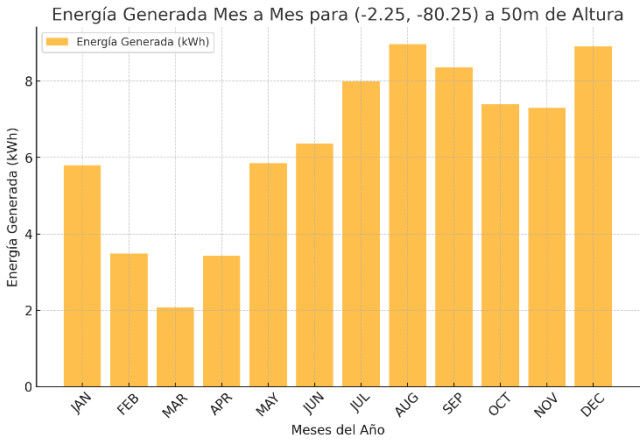


Figura 58 Energía generada por mes para (-2.25,-80.25) 50 m. Fuente: Propia

En las siguientes graficas se muestra el comportamiento del viento para la estimacion de generacion de energia durante el año para la altura de 50 m.

Para el punto (-1.25, -78.25) se nota considerablemente que la altura influye para la generacion de energia a lo largo del año representado en la Figura 59.

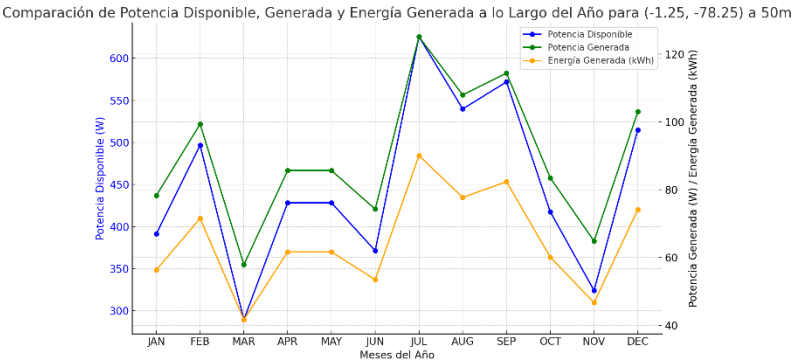


Figura 59 Potencia disponible, generada y energía generada para (-1.25,-78.25)50 m.
Fuente: Propia

Para el punto (-3.75, -78.75) sigue la misma tendencia donde se nota considerablemente que al estar a 50 m de altura tiene una generacion de energia buena como lo muestra la Figura 60.

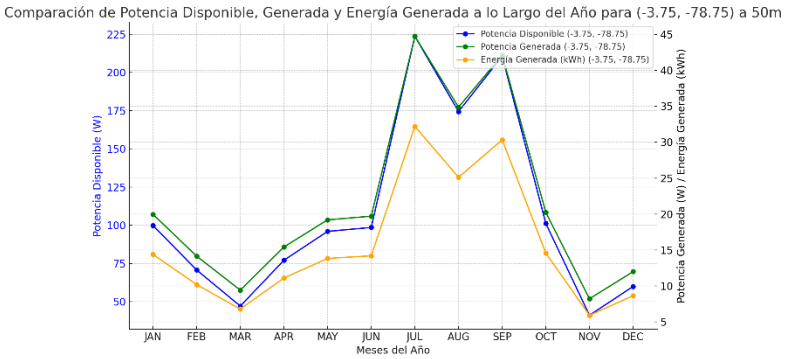


Figura 60 Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 50 m.
Fuente: Propia

Para el tercer punto (-2.25, -80.25), se observa en la Figura 61 una mejora en la generación de energía en comparación con las gráficas del viento a 10 m de altura, lo que corrobora que la altura influye en la generación de energía de los aerogeneradores.

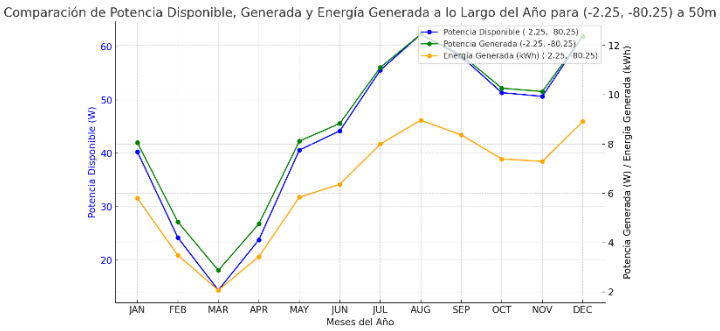


Figura 61 Potencia disponible, generada y energía generada para (-2.25,-80.25) 50 m.
Fuente: Propia

4.10.5. Resultados de la estimacion de energia generada

A continuación, se muestran en las Tabla 22 y Tabla 23, la estimación de la energía generada para cada punto a la altura de 10 m y 50 m.

Tabla 22

Resultados a 10 m de altura

Latitud	Longitud	Mes	Potencia Disponible (W) - 10m	Potencia Generada (W) - 10m	Energía Generada (kWh) - 10m
-1.25	-78.25	JUL	289.256307	57.85126136	41.65290818
-3.75	-78.75	JUL	103.319573	20.66391458	14.8780185
-2.25	-80.25	AUG	28.7719743	5.754394869	4.143164306

Nota. Fuente: Propia

Tabla 23

Resultados a 50 m de altura

Latitud	Longitud	Mes	Potencia Disponible (W) - 50m	Potencia Generada (W) - 50m	Energía Generada (kWh) - 50m
-1.25	-78.25	JUL	625.4776635	125.0955327	90.06878355
-3.75	-78.75	JUL	223.7114406	44.74228812	32.21444745
-2.25	-80.25	AUG	62.2981687	12.45963374	8.970936293

Nota. Fuente: Propia

En la Tabla 24 y Tabla 25 se muestra la energía anual generada para cada punto.

Tabla 24

Resultados de la energía anual generada a 10 m de altura

Latitud	Longitud	Energía Generada (kWh) - 50m
-1.25	-78.25	359.18 kWh
-3.75	-78.75	86.44 kWh
-2.25	-80.25	35.07 kWh

Nota. Fuente: Propia

Tabla 25

Resultados de la energía anual generada a 50 m de altura

Latitud	Longitud	Energía Generada (kWh) - 50m
-1.25	-78.25	777.55 kWh
-3.75	-78.75	187.16 kWh
-2.25	-80.25	75.94 kWh

Nota. Fuente: Propia

La energía generada por los generadores Vortex Bladeless varía significativamente dependiendo de la altura a la que se encuentren instalados, ya que la velocidad del viento tiende a aumentar con la altitud. En este análisis, comparamos los valores de energía generada anualmente a 10 m y 50 m de altura para tres puntos geográficos específicos:

Punto 1: (-1.25, -78.25)

- A 10 m de altura: La energía generada anual es 359.18 kWh, lo que representa una producción considerable de energía. Este valor refleja un lugar con buenas condiciones de viento, aunque los valores a 50 m son significativamente más altos, lo que sugiere que un aumento en la altura de los generadores aumentaría considerablemente la producción energética.
- A 50 m de altura: La energía generada anual es 777.55 kWh, lo que duplica la cantidad generada a 10m. Esto es coherente con la teoría eólica, que indica que el viento aumenta con la altura, lo que permite que el generador convierta más energía.

Punto 2: (-3.75, -78.75)

- A 10 m de altura: La energía generada anual es 86.44 kWh, lo que es una producción moderada de energía. A pesar de que no se genera tanto como en el punto anterior, las condiciones siguen siendo razonablemente favorables para la instalación de generadores eólicos.
- A 50 m de altura: A 50 m, la energía generada anual es 187.16 kWh, lo que dobla la generación de 10m. Esto confirma que la altura tiene un impacto significativo en la generación de energía en este punto también.

Punto 3: (-2.25, -80.25)

- A 10 m de altura: La energía generada anual es 35.07 kWh, que es la más baja de los tres puntos estudiados. Esto indica que las condiciones de viento en este lugar no son tan favorables como en los otros puntos.
- A 50 m de altura: A 50 m, la energía generada anual es 75.94 kWh, lo que duplica la generación en comparación con 10 m. A pesar de la baja producción comparada

con los otros puntos, este incremento muestra que la altura sigue siendo un factor importante para mejorar la eficiencia de la generación.

Conclusiones

- Se comprobó que la tecnología Vortex Bladeless presenta un enfoque innovador para la generación de energía eólica sin aspas, reduciendo el impacto ambiental y las restricciones espaciales en comparación con los aerogeneradores convencionales. Su eficiencia está estrechamente relacionada con las condiciones de viento específicas de cada región, lo que resalta la importancia de un análisis detallado de los factores ambientales antes de su implementación.
- El análisis de la velocidad del viento mediante la distribución de Weibull permitió caracterizar la variabilidad del recurso eólico en diferentes ubicaciones del Ecuador. Se determinó que a mayores alturas, la velocidad promedio del viento es superior, lo que incrementa el potencial de generación de energía. Sin embargo, la distribución de velocidades varía según la región, lo que evidencia la necesidad de estudios específicos para optimizar la selección de sitios adecuados para la instalación de aerogeneradores.
- La simulación en MATLAB y Simulink permitió calcular la potencia y energía generada por los aerogeneradores Vortex Bladeless, validando la viabilidad de esta tecnología en diversas ubicaciones del Ecuador. Se observó que, aunque la eficiencia del sistema es inferior a la de los aerogeneradores convencionales, su facilidad de instalación y bajo impacto lo convierten en una alternativa viable para aplicaciones de generación distribuida y autoconsumo en zonas urbanas y rurales.

Recomendaciones

- Se sugiere evaluar la integración de estos sistemas en microrredes híbridas con otras fuentes renovables, lo que permitiría maximizar su eficiencia y contribuir a una mayor penetración de energías limpias en el sistema energético del país.
- Tomar en cuenta que los resultados obtenidos representan estimaciones teóricas, las cuales podrían diferir de los valores reales debido a factores como turbulencia, pérdidas mecánicas, eficiencia variable del generador, y condiciones ambientales locales. Por ello, para aplicaciones prácticas, se recomienda complementar este tipo de análisis con mediciones de campo donde se quiera instalar el aerogenerador y pruebas piloto que permitan ajustar los modelos.

Referencias bibliográficas

[1] IEA, World Energy Outlook: Executive Summary, 2018.

[2] M. W. Motyka, Global Electricity Review 2023, Małgorzata Wiatros-Motyka: Ember, 2022.

[3] M. d. E. y. Minas, «recursosyenergia.gob.ec,» ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES, 2020). [En línea]. Available: https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/. [Último acceso: 23 Octubre 2023].

[4] IRENA, Renewable Energy Statistics 2022, Abu Dhabi: IRENA, 2022.

[5] J. A.-M. D. R.-M. J. M. T.-A. C. N.-L. J. S.-P. José Luis Torres-Madroñero, «Technological and operational aspects that limit small wind turbines,» *Energies,* vol. 13(22), nº 6123, 2020.

[6] G. G. Sergio, «Estudio de viabilidad de sistema de aprovechamiento eólico urbano,» Universidad del País Vasco, Bilbao, 2019.

[7] J. G. Gonzales, «Simulación del aprovechamiento,» Leganes, 2019.

[8] J. A. V. Vidal, «Diseño de un sistema eolico aislado para la electrificación rural en poblaciones dispersas en la provincia de junin,» Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo, 2020.

[9] N. D. y. G. CONTRERAS, «repository.uamerica.edu.co,» FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA , Agosto 2019. [En línea]. Available: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7553/21/4142843-2019-2-IM.pdf. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[10] A. K. A. Garcia, «Anális de la Participacion de la Energía Eolica en México,» Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Mexico, 2018.

[11] C. E. Y. C. GONZÁLEZ, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR TIPO EJE HORIZONTAL DE 1200 WATTS PARA PROVEER DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UN PISO DE LA HOSTERÍA LAS MERCEDES,» Quito, 2019.

[12] M. Ciucci, «www.europarl.europa.eu,» Noviembre 2023. [En línea]. Available: https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[13] M. P. Rasmussen, «www.siemensgamesa.com,» 4 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.siemensgamesa.com/es-es/descubrir/revista/2021/03/siemens-gamesa-future-offshore-wind-technology. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[14] D. J. Y. Villarreal, «VIV resonant wind generators,» 7 Junio 2018. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[15] S. G. Garcia, «Estudio de Viavilidad de sistema de aprovechamiento eólico,» Universidad del PaÍs Vasco , 19 Junio 2019. [En línea]. Available: https://addi.ehu.eus/handle/10810/36543?show=full. [Último acceso: 3 Enero 2024].

[16] R. A. P. Miguel Ángel Sánchez Hidalgo, NUEVO CONCEPTO DE GENERACION EOLICA., Madrid: Javier Morales Pérez, 2017.

[17] Vortex bladeless SL, «https://vortexbladeless.com/cost-effectiveness-analysis-bladeless,» 12 Junio 2019. [En línea]. Available: https://vortexbladeless.com/cost-effectiveness-analysis-bladeless/..

[18] Arcgis, «www.arcgis.com,» NASA, 5 Agosto 2019. [En línea]. Available: https://www.arcgis.com/home/item.html?id=67bc03c77f5044fbbb35322cb6f16915. [Último acceso: 27 Noviembre 2024].

[19] Deingenierias, «deingenierias.com,» 11 Noviembre 2023. [En línea]. Available: https://deingenierias.com/software/matlab/. [Último acceso: 24 Octubre 2024].

[20] globalwindatlas, «globalwindatlas.info,» [En línea]. Available: https://globalwindatlas.info/es/about/introduction.

[21] D. Meeker, «Finite Element Method Magnetics,» 14 December 2013. [En línea]. Available: https://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial.

[22] N. S. &. S. L. G. Pearre, «Statistical approach for improved wind speed forecasting,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* pp. 180-191, 2018.

[23] M. G. A. Gáme, «VARIABILIDAD A CORTO PLAZO DE LA VELOCIDAD DE VIENTO Y SU,» UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, México. , 2018.

[24] E. E.-R. F. P. M. Francisco Eraso Checa, «http://www.scielo.org.co/,» *Revista Científica,* pp. 19-31, Junio (2018.

[25] M. C. P. ANDREA, «repository.unilibre.edu.co,» UNIVERSIDAD LIBRE , 2019. [En línea]. Available: https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10602/Monograf%C3%ADa.pdf?sequence=1.

[26] A. Rivera, «futuroelectrico.com,» 16 Marzo 2022. [En línea]. Available: https://futuroelectrico.com/energia-minieolica/. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[27] S. S. Ramos, «Análisis del sector de las energías la economia del hidrógeno,» Comillas Universidad Pontifica, Madrid, 2021.

[28] D. H. J. &. L. J. I. Hayashi, «Gone with the wind: A learning curve,» *Energy Policy,* pp. 38-51, 2018.

[29] NASA, «power.larc.nasa.gov,» NASA, [En línea]. Available: https://power.larc.nasa.gov/. [Último acceso: 24 Octubre 2024].

[30] google, «www.google.com,» [En línea]. Available: https://www.google.com/maps/about/mymaps/.

ANEXOS

A. Código fuente para la simulación en Matlab

```
clc; clear; close all; % Limpiar consola, variables y cerrar figuras

disp('=====================================================');
disp('  SIMULACIÓN DE GENERADOR VORTEX BLADELESS - ALTURA 10M y 50M');
disp('=====================================================');

% Parámetros del sistema
rho = 1.225; % Densidad del aire (kg/m^3)
A = 0.97; % Área efectiva del generador (m²)
eta = 0.2; % Eficiencia del generador (20%)
t = 720; % Horas en el mes (30 días * 24 horas)

% Constante combinada para P_disponible
constValue = 0.5 * rho * A;
assignin('base', 'constValue', constValue);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

% Ruta del archivo Excel (Datos de 10M) - Asegurar extensión correcta
filePath = 'D:\ x10m.csv';
%filePath = 'D:\ x50m.csv';

% Intentar leer datos del archivo
try
    data = readtable(filePath, 'VariableNamingRule', 'preserve');
catch
    error('No se pudo leer el archivo. Verifique la ruta y el
formato.');
end

% Obtener coordenadas únicas
unique_coords = unique(data(:, {'LAT', 'LON'}));

% Mostrar coordenadas disponibles
disp('Lista de coordenadas disponibles:');
disp(unique_coords);

% Mapeo de meses inglés -> español
months_en = {'JAN', 'FEB', 'MAR', 'APR', 'MAY', 'JUN', ...
             'JUL', 'AUG', 'SEP', 'OCT', 'NOV', 'DEC'};
```

```
months_es = {'Enero', 'Febrero', 'Marzo', 'Abril', 'Mayo', 'Junio',
...
             'Julio', 'Agosto', 'Septiembre', 'Octubre', 'Noviembre',
'Diciembre'};

% Obtener meses únicos en inglés y ordenarlos correctamente
unique_months = unique(data.Month);
[~, orderIdx] = ismember(unique_months, months_en);
[~, sortedIdx] = sort(orderIdx);
sorted_months_en = unique_months(sortedIdx);
sorted_months_es = months_es(orderIdx(sortedIdx));

% Mostrar los meses en español
disp('Lista de meses disponibles (ordenados de enero a diciembre):');
disp(sorted_months_es);

% Solicitar al usuario un punto y mes específico
LAT = input('Ingrese la LAT de la lista mostrada: ');
LON = input('Ingrese la LON de la lista mostrada: ');
Month_es = input('Ingrese el mes en español (Ejemplo: Julio): ', 's');

% Convertir el mes ingresado a inglés
idx = find(strcmpi(months_es, Month_es)); % Busca el índice del mes en
español
if isempty(idx)
    error('Mes inválido. Use nombres como "Enero", "Febrero", etc.');
end
Month = months_en{idx}; % Convierte el mes a inglés para filtrar los
datos

% Manejo de tolerancia en LAT y LON
tolerancia = 0.01;
filteredData = data(abs(data.LAT - LAT) < tolerancia & abs(data.LON -
LON) < tolerancia & strcmp(data.Month, Month), :);

if isempty(filteredData)
    disp('No se encontraron datos para el punto y mes
seleccionados.');
    return;
end

% Extraer velocidades y probabilidades de Weibull sin repeticiones
velocity = filteredData.("Velocity (m/s)");
probability = filteredData.("Weibull_Probability");

% Normalizar la distribución de Weibull
probability = probability / sum(probability);

% Calcular potencia disponible y generada ponderando por Weibull
```

```
power_available = 0.5 * rho * A .* (velocity .^ 3) .* probability;
power_generated = eta * power_available;
energy_generated = sum(power_generated) * t / 1000; % Energía total en
kWh

% Imprimir resultados
fprintf('\n----------------------------------------------------\n');
fprintf('Resultados para LAT = %.2f, LON = %.2f, MES = %s\n', LAT,
LON, Month_es);
fprintf('Potencia disponible promedio del viento: %.2f W\n',
sum(power_available));
fprintf('Potencia generada promedio: %.2f W\n', sum(power_generated));
fprintf('Energía generada en el mes: %.2f kWh\n', energy_generated);
fprintf('----------------------------------------------------\n');

% Eliminar valores repetidos
[velocity_unique, idx] = unique(velocity, 'stable');
probability_unique = probability(idx);

% Generar un vector de tiempo sin repeticiones
dt = max(velocity_unique) / length(velocity_unique);
time = (0:length(velocity_unique)-1) * dt;

% Formatear matrices para Simulink
velocity_with_time_10m = [time(:), velocity_unique(:)];
probability_with_time_10m = [time(:), probability_unique(:)];

% Asignar datos al espacio de trabajo para Simulink
assignin('base', 'velocity_with_time_10m', velocity_with_time_10m);
assignin('base', 'probability_with_time_10m',
probability_with_time_10m);

disp('----------------------------------------------------');
disp(['Datos preparados para LAT = ', num2str(LAT), ', LON = ',
num2str(LON), ', MES = ', Month_es]);
disp('Listo para la simulación en Simulink con datos a 10 metros.');
disp('----------------------------------------------------');
```

B. Energía generada (kW) mensual de cada coordenada a 10m altura

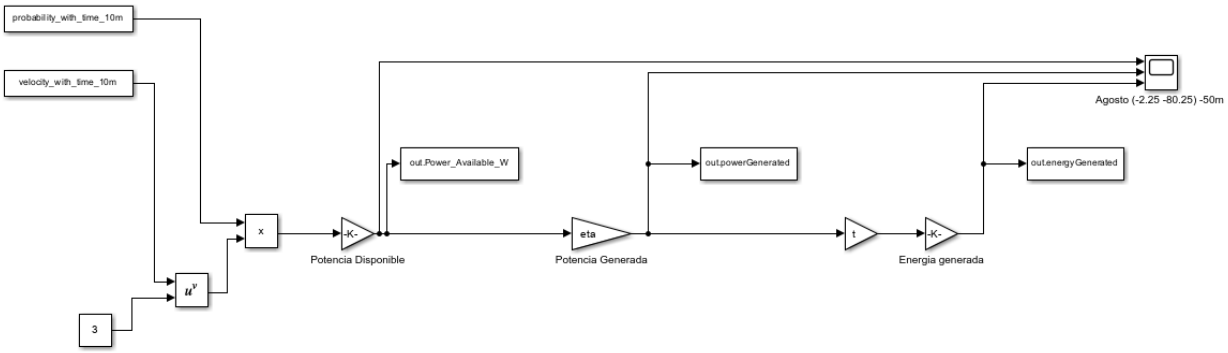
LAT	LON	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
-4.75	**-79.25**	0.63	0.57	0.38	0.62	1.57	1.72	5.59	2.72	2.77	0.69	0.24	0.50
-4.25	**-79.75**	33.25	22.17	14.99	18.75	24.98	23.70	34.45	41.32	33.25	32.09	32.47	32.09
-4.25	**-79.25**	0.84	0.36	0.28	0.85	1.48	1.39	2.80	3.44	1.43	0.94	0.94	0.57
-4.25	**-78.75**	0.39	0.27	0.18	0.30	0.45	0.48	1.12	0.75	0.84	0.40	0.18	0.25
-3.75	**-80.25**	35.27	31.24	17.98	20.79	24.59	24.59	25.30	31.51	31.24	30.14	27.27	39.96
-3.75	**-79.75**	29.03	21.14	15.25	20.60	28.36	25.18	38.28	45.57	33.26	29.71	29.03	28.70
-3.75	**-79.25**	0.86	0.38	0.35	1.06	1.88	1.78	3.76	4.39	1.88	1.13	1.12	0.64
-3.75	**-78.75**	6.64	4.70	3.13	5.12	6.38	6.55	14.88	11.60	14.01	6.72	2.73	3.98
-3.25	**-80.25**	30.97	27.13	15.98	21.34	29.12	27.56	30.73	36.98	29.35	26.91	26.06	36.19
-3.25	**-79.75**	24.56	19.76	14.15	20.89	30.08	28.06	44.24	50.21	35.71	26.41	24.82	25.34
-3.25	**-79.25**	12.28	13.05	9.64	12.47	38.11	38.52	118.91	72.09	76.50	18.65	6.63	11.17
-3.25	**-78.75**	25.82	18.13	11.83	22.72	27.75	27.19	61.20	47.95	60.25	28.03	10.01	15.51
-3.25	**-78.25**	6.69	5.16	3.98	5.89	5.64	5.89	9.86	10.04	12.17	7.41	4.18	4.82
-2.75	**-80.25**	27.21	19.65	11.26	18.45	29.76	29.76	36.49	42.09	34.89	29.36	28.76	36.26
-2.75	**-79.75**	27.04	21.16	14.68	17.63	26.07	26.55	37.46	43.22	36.26	29.05	29.05	33.64
-2.75	**-79.25**	23.77	19.80	17.01	19.27	25.31	26.26	46.78	47.73	36.33	25.00	23.17	22.30
-2.75	**-78.75**	19.48	13.40	7.83	21.56	36.33	35.73	86.60	57.49	64.83	24.02	7.50	13.09
-2.75	**-78.25**	1.09	0.92	0.72	1.09	1.13	1.22	1.91	1.79	2.15	1.24	0.73	0.99
-2.75	**-77.75**	1.35	1.09	1.12	1.02	1.02	0.92	1.23	1.35	1.56	1.27	1.12	1.39
-2.25	**-80.25**	2.68	1.61	0.96	1.58	2.70	2.94	3.70	4.14	3.87	3.42	3.37	4.12
-2.25	**-79.75**	3.05	2.21	1.59	1.56	2.15	2.36	2.97	3.54	3.56	3.48	3.71	4.63
-2.25	**-79.25**	31.04	29.14	23.93	20.33	21.57	21.57	27.33	30.40	28.83	26.74	28.23	36.48
-2.25	**-78.75**	14.87	10.73	6.27	17.46	42.49	43.48	111.52	66.42	65.54	19.35	7.04	12.83
-2.25	**-78.25**	0.98	0.96	0.76	1.05	1.20	1.30	1.99	1.75	1.88	1.08	0.76	1.14
-2.25	**-77.75**	1.27	1.30	1.20	1.10	0.94	0.97	1.06	1.27	1.41	1.27	1.20	1.41
-2.25	**-77.25**	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
-1.75	**-80.25**	2.71	1.55	0.94	1.54	2.50	2.84	3.56	4.02	3.91	3.75	3.67	4.52
-1.75	**-79.75**	3.12	2.18	1.61	1.56	1.89	2.14	2.70	3.31	3.61	3.79	4.02	5.00
-1.75	**-79.25**	31.63	27.31	22.67	20.78	20.11	20.56	27.58	31.32	30.73	28.70	29.85	37.72
-1.75	**-78.75**	15.52	6.88	5.80	26.52	43.52	40.74	87.71	78.50	46.42	20.21	16.25	11.48
-1.75	**-78.25**	28.26	24.52	20.08	27.82	32.35	29.14	41.13	43.41	38.41	25.73	23.36	24.92
-1.75	**-77.75**	30.37	36.32	28.80	28.04	24.42	23.06	26.55	30.37	31.18	28.80	29.58	39.09
-1.75	**-77.25**	4.21	4.21	3.87	3.24	3.24	3.24	4.39	4.21	4.21	4.04	4.39	4.39
-1.75	**-76.75**	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.09
-1.75	**-76.25**	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.10
-1.25	**-80.25**	4.47	2.64	1.57	2.72	4.04	4.39	5.51	6.50	6.41	6.46	6.08	7.25
-1.25	**-79.75**	0.71	0.51	0.36	0.36	0.40	0.41	0.50	0.66	0.78	0.85	0.86	1.04
-1.25	**-79.25**	0.77	0.65	0.51	0.46	0.43	0.40	0.53	0.62	0.68	0.68	0.68	0.83

-1.25	**-78.75**	17.93	6.52	6.29	20.25	35.98	35.98	86.91	74.80	45.19	22.25	18.38	11.52
-1.25	**-78.25**	26.04	33.04	19.26	28.49	28.49	24.70	41.65	35.90	38.05	27.77	21.57	34.24
-1.25	**-77.75**	31.43	36.73	23.95	30.19	25.55	21.42	28.39	30.19	32.06	30.19	28.39	40.33
-1.25	**-77.25**	4.19	4.04	3.74	3.32	3.45	3.32	4.35	4.68	4.68	4.04	4.68	4.85
-1.25	**-76.75**	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
-1.25	**-76.25**	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05
-1.25	**-75.75**	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05
-0.75	**-80.25**	2.04	1.26	0.73	1.49	2.02	2.06	2.54	3.07	3.05	3.18	2.92	3.22
-0.75	**-79.75**	0.66	0.48	0.32	0.41	0.47	0.42	0.51	0.69	0.82	0.84	0.82	0.93
-0.75	**-79.25**	0.76	0.65	0.48	0.47	0.48	0.40	0.50	0.61	0.70	0.70	0.69	0.79
-0.75	**-78.75**	29.24	13.34	14.69	14.00	20.40	22.19	57.24	51.69	36.35	30.73	28.51	18.18
-0.75	**-78.25**	22.19	21.29	12.61	25.05	27.09	24.80	48.25	36.98	39.95	25.30	15.83	25.05
-0.75	**-77.75**	0.75	0.70	0.47	0.81	0.77	0.71	1.13	1.05	1.13	0.85	0.59	0.87
-0.75	**-77.25**	0.12	0.11	0.11	0.09	0.10	0.09	0.12	0.14	0.16	0.11	0.11	0.15
-0.75	**-76.75**	0.11	0.12	0.11	0.08	0.10	0.10	0.13	0.13	0.15	0.13	0.13	0.12
-0.75	**-76.25**	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05
-0.75	**-75.75**	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05
-0.25	**-80.25**	1.82	1.14	0.63	1.72	2.23	2.24	2.60	3.02	3.02	3.27	3.00	3.00
-0.25	**-79.75**	2.11	1.49	0.93	1.63	2.04	1.78	2.11	2.73	3.12	3.22	3.02	3.12
-0.25	**-79.25**	0.40	0.33	0.24	0.27	0.30	0.25	0.28	0.35	0.42	0.44	0.42	0.45
-0.25	**-78.75**	35.99	26.54	27.23	13.12	11.88	12.70	18.37	20.02	19.46	31.60	34.35	25.87
-0.25	**-78.25**	16.27	12.26	7.92	18.66	24.97	26.74	57.15	40.34	42.46	19.57	10.47	16.60
-0.25	**-77.75**	0.86	0.67	0.50	1.01	1.15	1.24	2.31	1.93	2.08	1.11	0.60	0.90
-0.25	**-77.25**	0.12	0.12	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.14	0.17	0.11	0.11	0.14
-0.25	**-76.75**	0.10	0.12	0.11	0.09	0.10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.15	0.13	0.12
-0.25	**-76.25**	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0.25	**-79.75**	0.73	0.49	0.30	0.71	0.90	0.83	0.99	1.19	1.30	1.37	1.27	1.21
0.25	**-79.25**	0.92	0.71	0.52	0.70	0.82	0.69	0.81	1.01	1.19	1.25	1.20	1.19
0.25	**-78.75**	32.62	29.23	27.00	18.47	15.30	15.09	13.66	16.17	18.72	28.58	32.62	27.94
0.25	**-78.25**	15.97	10.20	10.33	18.91	29.01	24.58	50.05	48.49	38.42	17.50	10.90	13.36
0.25	**-77.75**	13.51	10.94	8.57	17.42	25.40	26.38	59.08	44.64	45.11	19.50	9.71	14.59
0.25	**-77.25**	0.19	0.16	0.16	0.24	0.25	0.25	0.39	0.40	0.41	0.29	0.16	0.21
0.25	**-76.75**	0.59	0.59	0.66	0.61	0.56	0.61	0.72	0.86	0.96	0.93	0.66	0.66
0.25	**-76.25**	0.69	0.60	0.66	0.52	0.63	0.60	0.75	0.66	0.82	0.85	0.66	0.75
0.75	**-79.25**	0.76	0.53	0.37	0.72	0.90	0.81	0.99	1.17	1.27	1.33	1.23	1.15
0.75	**-78.75**	2.38	1.97	1.64	1.80	1.88	1.70	1.80	2.06	2.31	2.46	2.41	2.36
0.75	**-78.25**	23.68	14.06	14.85	15.89	18.57	16.10	27.15	28.38	25.08	22.32	17.87	16.75
0.75	**-77.75**	11.26	10.92	8.41	15.12	24.98	24.11	58.00	39.20	37.24	15.55	10.09	13.10
1.25	**-78.75**	3.54	2.24	1.95	2.22	3.23	2.88	3.93	4.39	4.69	4.54	3.35	3.23

C. Energía generada (kW) mensual de cada coordenada a 50m altura

LAT	LON	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
-4.75	**-79.25**	1.36	1.23	0.82	1.33	3.40	3.73	12.11	5.88	6.00	1.49	0.52	1.09
-4.25	**-79.75**	72.00	47.99	32.46	40.59	54.10	51.32	74.59	89.37	72.00	69.47	70.31	69.47
-4.25	**-79.25**	1.81	0.79	0.61	1.84	3.20	3.01	6.06	7.45	3.09	2.03	2.03	1.23
-4.25	**-78.75**	0.85	0.58	0.39	0.66	0.98	1.04	2.43	1.63	1.81	0.87	0.39	0.54
-3.75	**-80.25**	76.35	67.63	38.93	45.02	53.23	53.23	54.78	68.23	67.63	65.27	59.05	86.45
-3.75	**-79.75**	62.86	45.77	33.03	44.60	61.41	54.52	82.84	98.28	72.01	64.33	62.86	62.13
-3.75	**-79.25**	1.87	0.82	0.76	2.30	4.08	3.86	8.15	9.51	4.08	2.46	2.43	1.38
-3.75	**-78.75**	14.37	10.18	6.78	11.10	13.82	14.19	32.21	25.11	30.33	14.56	5.91	8.62
-3.25	**-80.25**	67.05	58.74	34.59	46.20	63.05	59.68	66.54	80.05	63.54	58.27	56.43	78.34
-3.25	**-79.75**	53.18	42.78	30.64	45.24	65.13	60.76	95.53	107.63	77.30	57.18	53.74	54.87
-3.25	**-79.25**	26.58	28.26	20.88	27.00	82.49	83.36	172.34	141.64	146.41	40.38	14.36	24.19
-3.25	**-78.75**	55.90	39.26	25.60	49.20	60.08	58.87	126.97	103.13	125.47	60.69	21.67	33.58
-3.25	**-78.25**	14.48	11.18	8.63	12.76	12.22	12.76	21.34	21.73	26.34	16.03	9.06	10.44
-2.75	**-80.25**	58.91	42.54	24.39	39.94	64.44	64.44	78.99	90.99	75.54	63.57	62.27	78.49
-2.75	**-79.75**	58.55	45.81	31.78	38.17	56.45	57.49	81.09	93.38	78.49	62.90	62.90	72.84
-2.75	**-79.25**	51.47	42.88	36.84	41.73	54.80	56.86	100.77	102.70	78.66	54.12	50.18	48.28
-2.75	**-78.75**	42.17	29.01	16.95	46.68	78.66	77.35	155.30	120.93	132.35	52.01	16.24	28.33
-2.75	**-78.25**	2.36	1.99	1.55	2.36	2.45	2.64	4.13	3.88	4.67	2.68	1.59	2.15
-2.75	**-77.75**	2.92	2.36	2.43	2.21	2.21	2.00	2.67	2.92	3.38	2.75	2.43	3.01
-2.25	**-80.25**	5.80	3.49	2.07	3.43	5.85	6.36	8.00	8.97	8.37	7.39	7.30	8.92
-2.25	**-79.75**	6.60	4.79	3.45	3.38	4.66	5.11	6.43	7.66	7.72	7.53	8.03	10.02
-2.25	**-79.25**	67.20	63.10	51.81	44.02	46.71	46.71	59.17	65.81	62.43	57.90	61.11	78.98
-2.25	**-78.75**	32.19	23.24	13.58	37.81	91.83	93.94	169.41	134.55	133.34	41.90	15.24	27.79
-2.25	**-78.25**	2.11	2.08	1.64	2.27	2.59	2.81	4.31	3.79	4.07	2.34	1.64	2.46
-2.25	**-77.75**	2.74	2.82	2.59	2.37	2.04	2.11	2.30	2.74	3.06	2.74	2.59	3.06
-2.25	**-77.25**	0.09	0.07	0.08	0.07	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.08	0.08	0.11
-1.75	**-80.25**	5.87	3.36	2.04	3.33	5.41	6.15	7.72	8.71	8.47	8.12	7.94	9.78
-1.75	**-79.75**	6.75	4.73	3.49	3.38	4.10	4.64	5.84	7.17	7.81	8.21	8.70	10.82
-1.75	**-79.25**	68.48	59.12	49.08	45.00	43.54	44.51	59.72	67.82	66.53	62.14	64.63	81.65

-1.75	**-78.75**	33.61	14.90	12.56	57.42	94.01	88.12	156.14	148.38	100.03	43.77	35.18	24.85
-1.75	**-78.25**	61.18	53.10	43.47	60.25	70.05	63.09	88.97	93.78	83.12	55.71	50.57	53.96
-1.75	**-77.75**	65.77	78.63	62.37	60.71	52.87	49.93	57.49	65.77	67.51	62.37	64.05	84.59
-1.75	**-77.25**	9.11	9.11	8.37	7.02	7.02	7.02	9.50	9.11	9.11	8.74	9.50	9.50
-1.75	**-76.75**	0.14	0.12	0.13	0.10	0.10	0.13	0.12	0.14	0.14	0.14	0.13	0.19
-1.75	**-76.25**	0.15	0.12	0.13	0.11	0.11	0.12	0.11	0.14	0.16	0.14	0.13	0.21
-1.25	**-80.25**	9.67	5.71	3.40	5.88	8.74	9.51	11.92	14.08	13.88	13.98	13.17	15.69
-1.25	**-79.75**	1.53	1.10	0.78	0.78	0.88	0.89	1.09	1.44	1.68	1.84	1.85	2.25
-1.25	**-79.25**	1.67	1.40	1.11	1.00	0.92	0.87	1.15	1.35	1.46	1.46	1.48	1.80
-1.25	**-78.75**	38.81	14.11	13.62	43.85	77.89	77.89	155.53	144.64	97.50	48.18	39.79	24.95
-1.25	**-78.25**	56.37	71.53	41.70	61.68	61.68	53.48	90.07	77.72	82.35	60.13	46.69	74.14
-1.25	**-77.75**	68.05	79.52	51.85	65.37	55.33	46.38	61.47	65.37	69.42	65.37	61.47	87.25
-1.25	**-77.25**	9.07	8.74	8.09	7.18	7.48	7.18	9.42	10.13	10.13	8.74	10.13	10.50
-1.25	**-76.75**	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06
-1.25	**-76.25**	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11
-1.25	**-75.75**	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.11
-0.75	**-80.25**	4.42	2.73	1.57	3.23	4.38	4.46	5.50	6.64	6.60	6.88	6.32	6.98
-0.75	**-79.75**	1.43	1.05	0.69	0.88	1.02	0.91	1.11	1.50	1.76	1.83	1.76	2.01
-0.75	**-79.25**	1.64	1.41	1.05	1.02	1.03	0.88	1.08	1.32	1.53	1.53	1.50	1.70
-0.75	**-78.75**	63.30	28.89	31.80	30.32	44.18	48.04	120.52	110.47	78.70	66.53	61.73	39.37
-0.75	**-78.25**	48.05	46.09	27.29	54.24	58.65	53.71	103.75	80.05	86.43	54.78	34.27	54.24
-0.75	**-77.75**	1.63	1.51	1.02	1.76	1.66	1.54	2.46	2.27	2.46	1.84	1.27	1.89
-0.75	**-77.25**	0.27	0.24	0.23	0.20	0.22	0.20	0.25	0.30	0.34	0.23	0.25	0.33
-0.75	**-76.75**	0.24	0.25	0.23	0.18	0.21	0.21	0.28	0.28	0.32	0.28	0.28	0.25
-0.75	**-76.25**	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.10
-0.75	**-75.75**	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07	0.12
-0.25	**-80.25**	3.93	2.47	1.37	3.72	4.82	4.85	5.64	6.54	6.54	7.07	6.50	6.50
-0.25	**-79.75**	4.58	3.22	2.02	3.53	4.41	3.86	4.58	5.91	6.75	6.97	6.53	6.75
-0.25	**-79.25**	0.86	0.72	0.52	0.59	0.65	0.54	0.61	0.76	0.91	0.95	0.92	0.98
-0.25	**-78.75**	77.92	57.47	58.96	28.40	25.73	27.49	39.78	43.35	42.14	68.42	74.37	56.01
-0.25	**-78.25**	35.24	26.55	17.16	40.41	54.06	57.90	120.36	87.27	91.78	42.37	22.68	35.95
-0.25	**-77.75**	1.87	1.44	1.07	2.18	2.49	2.69	5.00	4.17	4.50	2.39	1.29	1.95
-0.25	**-77.25**	0.27	0.26	0.20	0.21	0.23	0.21	0.24	0.31	0.36	0.25	0.25	0.30
-0.25	**-76.75**	0.22	0.25	0.23	0.19	0.21	0.21	0.25	0.30	0.34	0.31	0.28	0.25
-0.25	**-76.25**	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07
0.25	**-79.75**	1.57	1.06	0.65	1.54	1.95	1.80	2.14	2.57	2.82	2.98	2.76	2.61
0.25	**-79.25**	1.99	1.54	1.12	1.52	1.77	1.50	1.75	2.18	2.57	2.72	2.59	2.57
0.25	**-78.75**	70.64	63.29	58.45	40.00	33.13	32.67	29.59	35.01	40.53	61.88	70.64	60.49
0.25	**-78.25**	34.59	22.08	22.38	40.95	62.82	53.22	107.32	104.22	83.15	37.89	23.60	28.92
0.25	**-77.75**	29.24	23.70	18.56	37.72	55.00	57.12	123.58	96.36	97.33	42.22	21.02	31.59

0.25	**-77.25**	0.41	0.35	0.34	0.51	0.54	0.53	0.85	0.87	0.90	0.63	0.34	0.45
0.25	**-76.75**	1.27	1.27	1.43	1.32	1.22	1.32	1.55	1.87	2.09	2.01	1.43	1.43
0.25	**-76.25**	1.49	1.30	1.42	1.12	1.36	1.30	1.63	1.42	1.77	1.85	1.42	1.63
0.75	**-79.25**	1.66	1.15	0.81	1.55	1.95	1.74	2.15	2.54	2.75	2.88	2.66	2.49
0.75	**-78.75**	5.16	4.27	3.56	3.90	4.08	3.69	3.90	4.45	5.00	5.32	5.22	5.11
0.75	**-78.25**	51.26	30.43	32.16	34.40	40.20	34.86	58.78	61.45	54.31	48.33	38.69	36.27
0.75	**-77.75**	24.39	23.64	18.21	32.74	54.10	52.19	121.80	84.84	80.61	33.66	21.84	28.36
1.25	**-78.75**	7.66	4.85	4.22	4.80	6.99	6.24	8.51	9.51	10.17	9.84	7.25	6.99

D. Diagrama esquemático Simulink