



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



TESIS
POTENCIAL DE LA ENERGÍA APLICANDO LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL
PARA AEROGENERADORES INTERCONECTADOS A RED EN EL
ALTIPLANO

PRESENTADA POR:
ELMER RODRIGO AQUINO LARICO
PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE
SISTEMAS ELÉCTRICOS

PUNO, PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mi querida esposa Nery Karen que siempre ha estado a mi lado apoyándome para seguir adelante y mi hermosa hija Valeska Killary por ser el motivo de mi existencia.



AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi asesor de tesis M.Sc. José Manuel Ramos Cutipa por el apoyo en la ejecución de este proyecto de investigación. A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica Eléctrica, mención: Gestión de Operación y mantenimiento de Sistemas Eléctricos, por la formación académica.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco Teórico	2
1.1.1. Energías renovables	2
1.1.2. Energía Eólica	3
1.1.3. Turbina de viento o aerogenerador	4
1.1.4. Velocidad y dirección del viento	7
1.1.5. Condiciones de viento	8
1.1.6. Distribución de la probabilidad de Weibull	10
1.1.7. Distribución de la probabilidad de Weibull de dos parámetros	11
1.1.8. Rosa de Viento	13
1.1.9. Características de la velocidad del viento	15
1.1.10. Sistema eólico conectado a red mediante simulación	16
1.2. Antecedentes	20

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	23
2.2. Enunciados del problema	24
2.2.1. Problema general	24
2.2.2. Problemas específicos	24
2.3. Justificación	24
2.4. Objetivos	25
2.4.1. Objetivo general	25
2.4.2. Objetivos específicos	25
2.5. Hipótesis	25



2.5.1.	Hipótesis general	25
2.5.2.	Hipótesis específicas	25
CAPÍTULO III		
MATERIALES Y MÉTODOS		
3.1.	Lugar de estudio	26
3.2.	Población	27
3.3.	Muestra	27
3.4.	Métodos de investigación	27
3.4.1.	Materiales y equipos	27
3.4.2.	Método de investigación por el modelo de la distribución de Weibull	28
3.4.3.	Estimación de parámetros Weibull	29
3.4.4.	Parámetros Weibull, frecuencia Relativa y Acumulada	30
3.4.5.	Frecuencias Relativas anuales	42
3.4.6.	Linealidad de Weibull	43
3.4.7.	Rosa de viento	43
3.4.8.	Simulación del sistema eólico conectado a red	44
3.5.	Descripción detallada de métodos por objetivos	44
3.5.1.	Objetivo de la velocidad y dirección del viento promedio anual	44
3.5.2.	Objetivo del modelo matemático de la energía eólica	45
3.5.3.	Objetivo de la simulación de un sistema eólico	45
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1.	Características de la velocidad del viento	47
4.2.	Análisis de parámetros Weibull de la velocidad del viento	48
4.3.	Distribución acumulativa y distribución de Weibull	51
4.4.	Análisis de dirección del viento (Rosa de viento)	53
4.5.	Simulación del sistema eólico conectado a red, operación y mantenimiento	60
CONCLUSIONES		65
RECOMENDACIONES		66
BIBLIOGRAFÍA		67
ANEXOS		72

Puno, 02 de febrero del 2022

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería Mecánica Eléctrica

TEMA: Potencial de la energía aplicando la distribución de Weibull para aerogeneradores interconectados a red en el Altiplano

LÍNEA: Ingeniería Mecánica Eléctrica



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Valores de parámetros de forma y escala para el ajuste Weibull, 24 horas y tarde	49
2. Perfiles de velocidad media del viento vs potencia estimada de 10 Kw	64

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Arquitectura de sistema de turbina eólica convencional	4
2. Sistema Off Grid de aerogeneradores	5
3. Capacidad eólica instalada hasta el 2017	6
4. Capacidad eólica instalada a nivel mundial	6
5. (a) Definición de moviente y (b) distribución de la velocidad del viento	8
6. Condición del viento, caso 1	9
7. Distribución del viento, caso3	10
8. Función densidad de la probabilidad de la distribución de Weibull	11
9. Función densidad acumulada de la distribución de Weibull	11
10. Gráfica de Weibull del conjunto de datos de muestra junto con las distribuciones de Weibull ajustadas por cada método	13
11. Rosa de viento de puerto Bolívar	14
12. Variación mensual de la velocidad media del viento en Faya-Largeau, Chad	16
13. Sistema eólico interconectado a red	17
14. Ubicación geográfica de la zona de estudio en el Altiplano de Juliaca	26
15. Anemómetro digital Mini Vane AMPROBE-USA	28
16. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de octubre del 2019	30
17. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de octubre del 2019	31
18. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de noviembre del 2019	31
19. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de noviembre del 2019	32
20. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de diciembre del 2019	32
21. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de diciembre del 2019	33
22. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de enero del 2020	33
23. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de enero del 2020	34
24. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de febrero del 2020	34
25. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de febrero del 2020	35
26. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de marzo del 2020	35
27. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de marzo del 2020	36
28. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de abril del 2020	36
29. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de abril del 2020	37
30. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de mayo del 2020	37
31. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de mayo del 2020	38



32. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de junio del 2020	38
33. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de junio del 2020	39
34. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de julio del 2020	39
35. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de julio del 2020	40
36. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de agosto del 2020	40
37. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de agosto del 2020	41
38. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de setiembre del 2020	41
39. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de setiembre del 2020	42
40. Frecuencias Relativas anuales de la velocidad del viento	43
41. Linealidad del Weibull para determinar el factor de forma y escala	43
42. Diagrama de bloques de simulación de un generador eólico conectado a red	44
43. Velocidad media del viento anual, 24 horas y tarde en Juliaca	48
44. Función densidad mensual de la distribución de Weibull, cada 24 horas	50
45. Función densidad mensual de la distribución de Weibull, por las tardes	50
46. Función acumulativa de la distribución de Weibull	51
47. Función de distribución de Weibull mensual, cada 24 horas	52
48. Función de distribución de Weibull mensual, por las tardes	52
49. Función de distribución de Weibull anual, 24 horas y por las tardes	53
50. Rosa de viento del mes de octubre del 2019 en Juliaca	54
51. Rosa de viento del mes de noviembre del 2019 en Juliaca	54
52. Rosa de viento del mes de diciembre del 2019 en Juliaca	55
53. Rosa de viento del mes de enero del 2020 en Juliaca	55
54. Rosa de viento del mes de febrero del 2019 en Juliaca	56
55. Rosa de viento del mes de marzo del 2020 en Juliaca	56
56. Rosa de viento del mes de abril del 2019 en Juliaca	57
57. Rosa de viento del mes de mayo del 2020 en Juliaca	57
58. Rosa de viento del mes de junio del 2019 en Juliaca	58
59. Rosa de viento del mes de julio del 2020 en Juliaca	58
60. Rosa de viento del mes de agosto del 2019 en Juliaca	59
61. Rosa de viento del mes de setiembre del 2020 en Juliaca	59
62. Rosa de viento media anual en Juliaca	60
63. Características mecánicas del aerogenerador SHZOND de 400 W	61
64. (a) Voltaje de inyección a la red, (b) Corriente de inyección a la red, (c) Voltaje de salida del inversor de red AC y (d) Voltaje en la entra del inversor DC	62



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Estación meteorológica inteligente Ambient Weather WS-2902C	72
2. Aerogenerador modelo: SHZOND 400W Wind Generator Hybrid Wind	74
3. Diagrama de bloques del sistema eólico conectado a red simulado en SIMULINK	75
4. Fotografías de la estación meteorológica y el anemómetro	77



RESUMEN

En los últimos años, la energía eólica ha experimentado un crecimiento acelerado en comparación de otras fuentes de energía renovable, por ello es importante determinar el potencial de la energía eólica disponible para la aplicación de aerogeneradores en el Altiplano peruano. El objetivo de este estudio es determinar el potencial de la energía por el método de la distribución de Weibull y la rosa de viento en el Altiplano peruano a más de 3800 msnm. Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó el método de la función de distribución de Weibull de dos parámetros, para estimar el perfil de la velocidad del viento y la perspectiva del viento, basado en observaciones del viento durante un año por la estación meteorológica del Altiplano peruano ubicado en el ámbito de Juliaca. Los resultados muestran que las características del viento son irregulares, donde el factor de forma y escala media anual es 2.16 y 2.20 m/s evaluados las 24 horas, sin embargo, el factor de forma y escala media anual por las tardes es 5.01 y 4.46 m/s respectivamente. Por lo tanto, este sitio presenta un potencial de la energía eólica alto por las tardes, debido a que el flujo del viento no es constante durante las 24 horas, pero si por las tardes.

Palabras clave: Distribución de Weibull, energía eólica, factor, viento, parámetros.



ABSTRACT

In recent years, wind energy has experienced rapid growth compared to other renewable energy sources, so it is important to determine the potential of wind energy available for the application of wind turbines in the Peruvian Altiplano. The objective of this study is to determine the potential of the energy by the Weibull distribution method and the wind rose in the Peruvian Altiplano at more than 3800 masl. For the development of this research, the Weibull distribution function method of two parameters was used to estimate the profile of the wind speed and the wind perspective, based on wind observations during a year by the meteorological station of the Peruvian Altiplano located in the area of Juliaca. The results show that the characteristics of the wind are irregular, where the mean annual shape and scale factor is 2.16 and 2.20 m/s evaluated 24 hours, however, the mean annual shape and scale factor in the afternoons is 5.01 and 4.46. m/s respectively. Therefore, this site has a high wind energy potential in the afternoons, because the wind flow is not constant during the 24 hours, but it is in the afternoons.

Keywords: Factor, parameters, Weibull distribution, wind energy, wind.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación refiere al tema de la determinación del potencial eólico en el altiplano peruano, donde en primera parte se detalla el problema de la investigación referente a los problemas energéticos con el recurso del viento, la aplicación de energías renovables, principalmente la energía eólica y características de funcionamiento a nivel de simulación en Matlab.

Seguidamente se detalla un marco teórico que aborda temas de energía eólica (potencial eólico y aerogeneradores), el método de la distribución de Weibull para determinar el potencial eólico, mediante los parámetros del factor de escala y forma del comportamiento del viento en los sistemas de generación eólico durante un año obteniendo un modelo matemático. Los resultados obtenidos permiten que determinar el potencial eólico en la región, mediante la función densidad del viento y la distribución de Weibull, aplicado a sistemas de aerogeneradores o turbina de viento.

Finalmente, este proyecto de investigación se ha estructurado de la siguiente manera: primeramente, se muestra el resumen en español e inglés, seguidamente se da una introducción a la presente tesis, luego se detalla la revisión de la literatura con el marco teórico y antecedentes, luego definimos el planteamiento del problema, la hipótesis y los objetivos, además especificamos los materiales y métodos utilizados en la presente investigación, para mostrar los resultados y discusiones con otros autores, finalmente terminamos con las conclusiones, recomendaciones y anexos desarrollados en la presente investigación.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Energías renovables

Las energías renovables constituyen un factor fundamental para el desarrollo energético y sostenible de la humanidad (Wang y Liu, 2020), siendo importante por ser limpia, amigable con el medio ambiente y para proteger a la atmosfera (Azam *et al.*, 2021), pudiendo ser una opción para reducir los problemas de cambio climático y evitando la quema de combustibles fósiles (Mohd Chachuli *et al.*, 2021), cubriendo parte de la demanda de energía a nivel mundial, como la energía solar, por la abundancia de la radiación solar, la energía eólica por la variabilidad del recurso del viento (Praveen *et al.*, 2020) y el potencial del hidrogeno, por su portabilidad energética (Ishaq y Dincer, 2021).

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida. Por ejemplo, la energía solar, la energía eólica o la energía mareomotriz son fuentes renovables de energía. También se consideran renovables cuando se obtienen a partir de fuentes que se regeneran con el tiempo de manera natural, como la masa forestal.

Una de las principales ventajas de las energías renovables es que, además de ser inagotables, presentan un nulo o bajo impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se consideran energías limpias. En la actualidad las energías renovables son una realidad presente en nuestra sociedad y sus beneficios para el medio ambiente son más que evidentes. Todas las sociedades del planeta son consumidoras de energía en mayor o menor medida, pero la realidad es que la mayor parte de la energía que se

consume procede de fuentes no renovables, como los combustibles fósiles y la energía nuclear, cuyo impacto negativo sobre el medio ambiente es superior. Un aspecto a destacar de las energías renovables es que pueden ser aplicadas y explotadas a nivel local, lo que ayuda a disminuir la dependencia de las poblaciones hacia los grandes productores de energía, favoreciendo el desarrollo económico y la creación de empleo.

1.1.2. Energía Eólica

Son sistemas que pueden capturar la velocidad del viento y convertirlo en energía eléctrica a pequeña, mediana o gran escala (Figura 1), utilizando turbinas eólicas (Bechtle *et al.*, 2019). Indirectamente es causado por la energía solar por la diferencia de temperatura de la superficie de la tierra, la rotación y los desniveles geográficos de la zona que originan el recurso del viento (Bahrami *et al.*, 2019).

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta energía la podemos convertir en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, limpia, que no contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles.

El mayor productor de energía eólica del mundo es Estados Unidos, seguido de Alemania, China, India y España. En América Latina el mayor productor es Brasil. En España, la energía eólica abasteció de electricidad al equivalente a 12 millones de hogares, esto es un 18% de las necesidades del país (Fuente AEE). Esto significa que gran parte de la energía verde que ofrecen las compañías eléctricas del país, proviene de los parques eólicos y tiene este origen renovable.

La energía eólica se ha convertido en una fuente de generación de electricidad clave para el cambio del modelo energético, más limpio y sostenible. La mejora de la tecnología permite que algunos campos eólicos produzcan energía eléctrica tan barata como lo hace el carbón o las centrales atómicas.

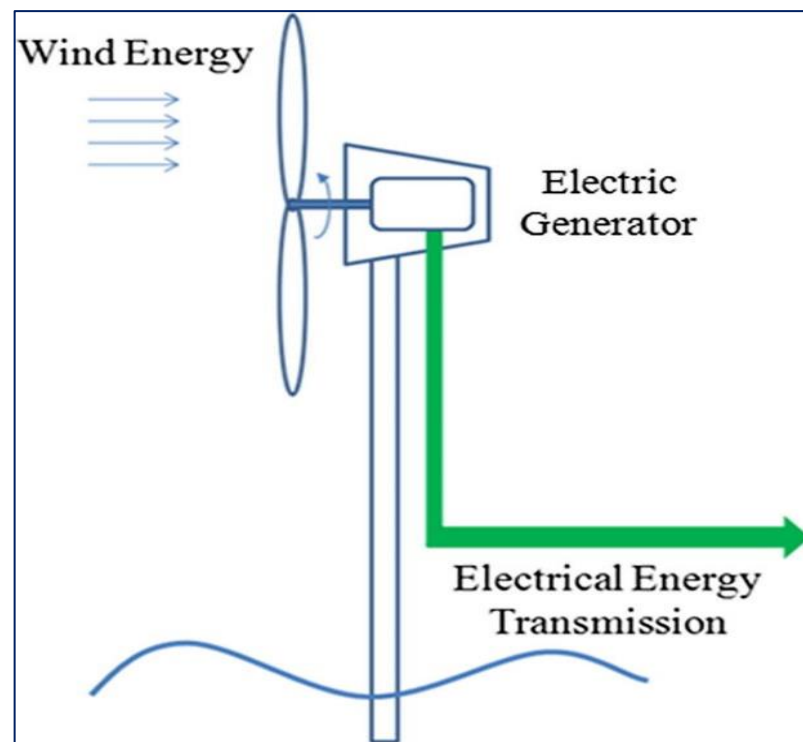


Figura 1. Arquitectura de sistema de turbina eólica convencional

Fuente: (Qin *et al.*, 2017)

1.1.3. Turbina de viento o aerogenerador

La energía eléctrica se puede generar a través de la fuerza del viento, mediante la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional acoplado a un generador eléctrico, llamado turbina eólica produciendo energía eléctrica con diferentes potencias y a diferentes alturas de instalación (Adaramola y Krogstad, 2011).

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, según su tecnología, a una velocidad constante o bien a velocidad variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia.

A lo largo de la historia son muchos los tipos de turbinas o máquinas que se han utilizado para aprovechar la energía cinética producida por el viento. De todas ellas, la más utilizada y extendida en nuestros días —y la escogida por Iberdrola— es aquella que cuenta con tres aspas moviéndose respecto a un eje horizontal. Esta es la opción más eficiente desde el punto de vista técnico: a menos palas, más equilibrio.

Como un campo de girasoles, los aerogeneradores se orientan siempre en la misma dirección para, en vez de seguir al sol, seguir al viento y aprovechar al máximo su energía potencial. Esto lo consiguen gracias a una veleta que todos llevan encima de la góndola y que indica al control si el rotor está correctamente situado frente al viento.

Un aerogenerador a gran escala está compuesto de una estructura con palas diseñadas aerodinámicamente instalados en una torre de 40, 50, 80, 100 y 120 m de altura (Figura 2), según sea la potencia requerida y la zona geográfica (Ke *et al.*, 2019).

La capacidad instalada de los aerogeneradores comenzó en Dinamarca en 1978 (Figura 3), con una capacidad de 2 MW y un diámetro de 54 m llegando hasta una capacidad de 9.5 MW y un diámetro de rotor de 164 m; hasta una capacidad instalada de 500GW en el año 2017 (Enevoldsen y Xydis, 2019).

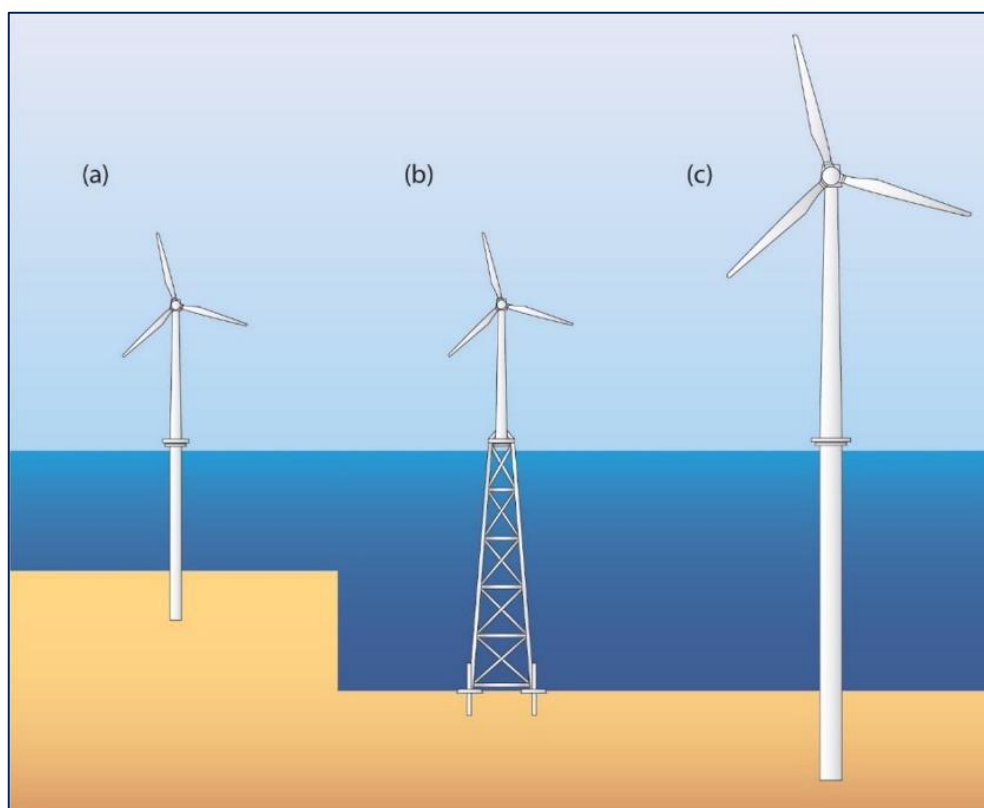


Figura 2. Sistema Off Grid de aerogeneradores

Fuente: (Qin *et al.*, 2017)

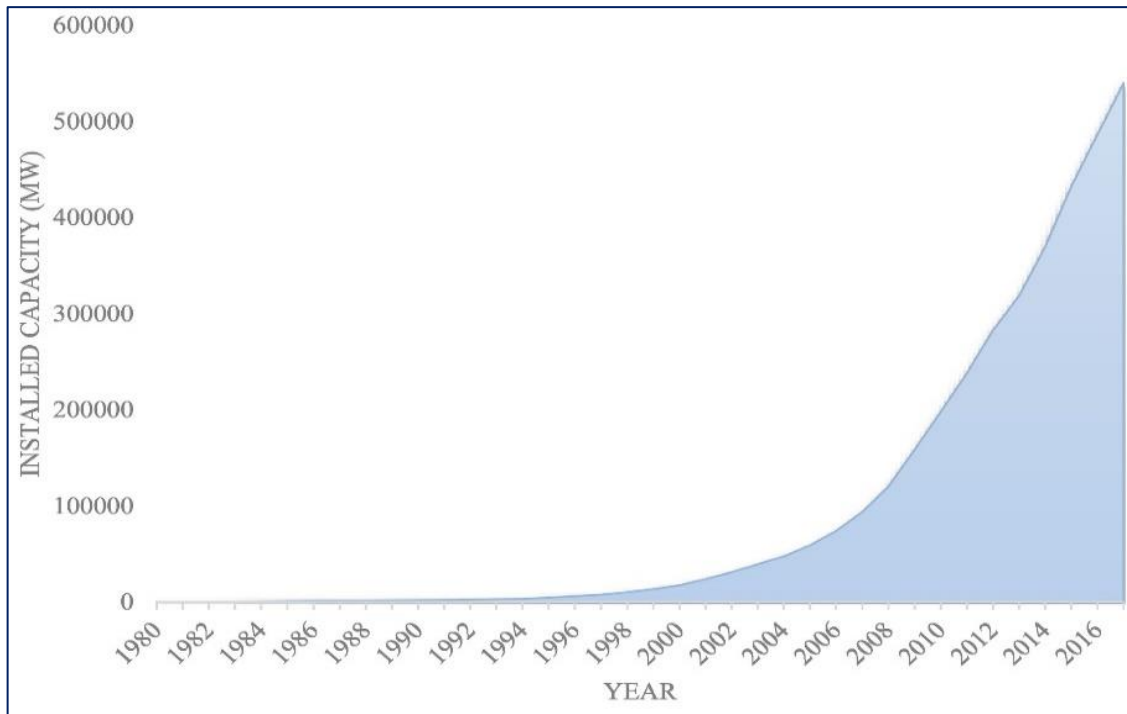


Figura 3. Capacidad eólica instalada hasta el 2017

Fuente: (Enevoldsen y Xydis, 2019)

La participación mundial de la energía eólica instalada es mayor en Europa, seguido por Asia mostrado en la Figura 4, esto se deba a la reducción de los combustibles fósiles y el calentamiento global, por lo tanto, la energía eolia es una opción de las energías renovables que el mundo está considerando en estos tiempos (Wais, 2017).

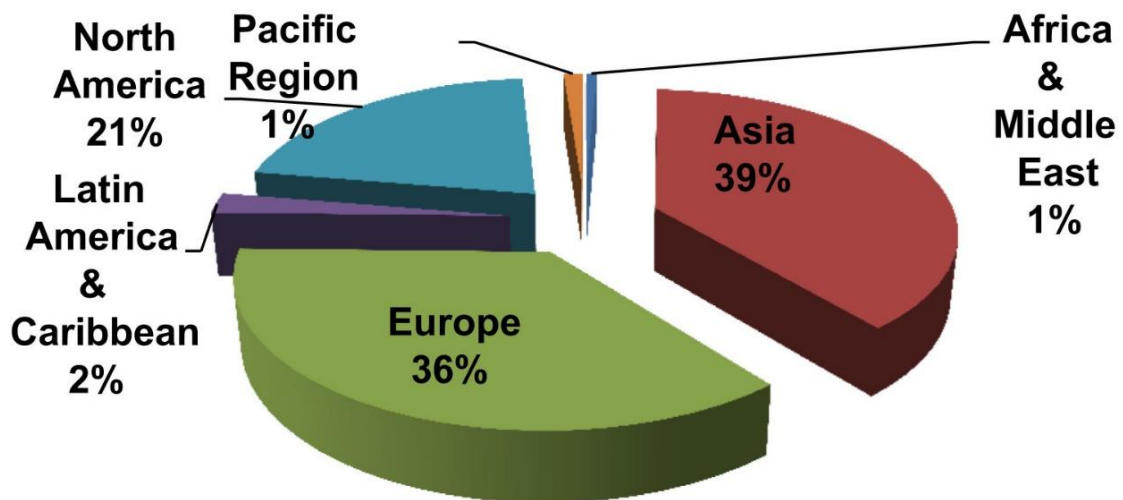


Figura 4. Capacidad eólica instalada a nivel mundial

Fuente: (Wais, 2017)

1.1.4. Velocidad y dirección del viento

La circulación meridional media de la atmósfera proporciona una idea de las características del viento. Las fuerzas que impulsan la circulación se originan en el calentamiento diferencial de la tierra por parte del sol, lo que hace que se desarrolle un gradiente de temperatura entre la línea ecuatorial y el polo norte (Figura 5). Los gradientes de densidad y presión asociados, si la tierra no girara, conducirían a un flujo de aire hacia el polo en la atmósfera superior y fluirían hacia el ecuador a niveles más bajos (Ahmed, 2018).

La velocidad del viento mide la componente horizontal del desplazamiento del aire en un punto y en un instante determinados. Se mide mediante un anemómetro, y la unidad de medida es habitualmente metros por segundo (m/s). Las ausencias de viento se denominan calmas.

La dirección mide la componente horizontal de la velocidad del viento. En meteorología es importante tener en cuenta que la dirección nos indica de dónde viene el viento, no hacia dónde va. Por ejemplo, el viento norte es el que sopla desde el norte. Se mide en grados, desde 0° (excluido) hasta 360° (incluido), girando en el sentido de las agujas del reloj en el plano horizontal visto desde arriba. Valores cercanos a 1° y 360° indican viento del norte, cercanos a 90° viento del este, 180° del sur y 270° del oeste. Entre estos valores tendremos el resto de direcciones: nordeste, sureste, suroeste y noroeste.

La dirección del viento se mide mediante una veleta. La velocidad y la dirección del viento se miden a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo en la mayoría de las estaciones, y a 2 metros de altura en algunas de ellas.

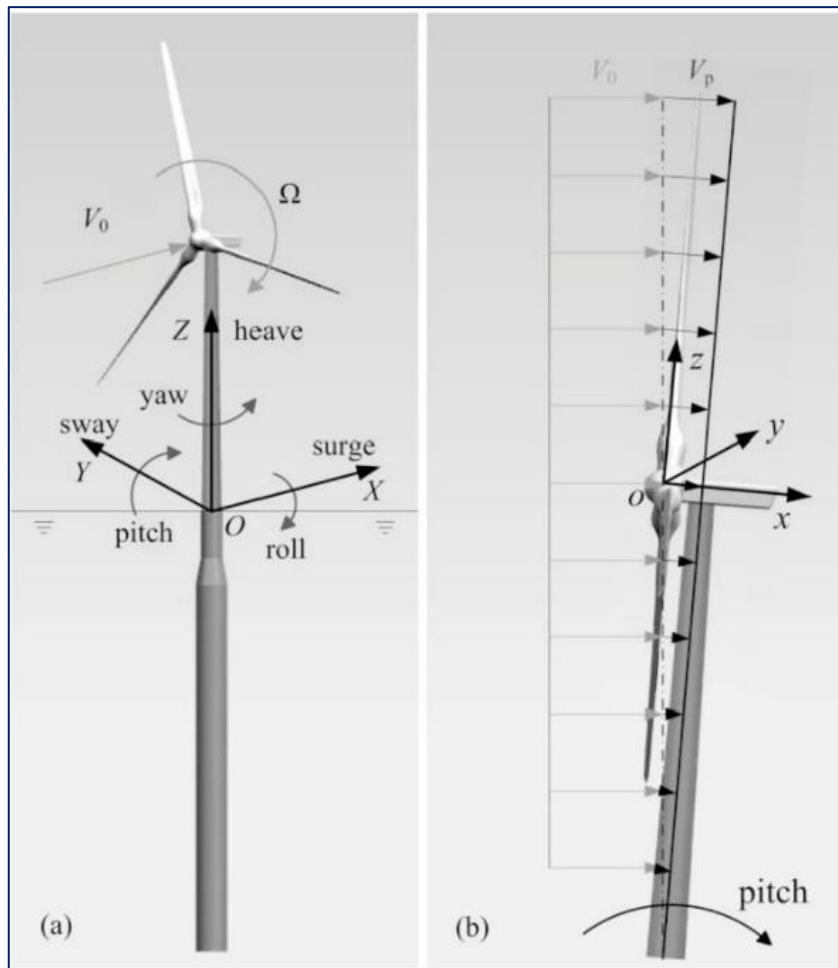


Figura 5. (a) Definición de moviente y (b) distribución de la velocidad del viento

Fuente: (Wen *et al.*, 2019)

1.1.5. Condiciones de viento

El potencial eólico tiene sus propias características y comportamiento eólico, estas características de cada sitio pueden favorecer o entorpecer el funcionamiento de un sistema eólico, debido a tres escenarios eólicos: velocidad en un sola dirección del viento posiblemente con velocidad constante (Figura 6), múltiple dirección con una sola velocidad del viento de 0° a 360° (Figura 7), y múltiples direcciones y velocidades del viento, siendo el más frecuente en algunas zonas del mundo, ocasionado los vientos cruzados con velocidad y dirección variable del viento (Mosetti *et al.*, 1994).

El viento se produce cuando una masa de aire se vuelve menos densa, al aumentar su temperatura, asciende y entonces, otra masa de aire más densa y fría se mueve para ocupar el espacio que la primera ha dejado.

Hay vientos generales y permanentes que recorren todo el globo terráqueo como consecuencia de la circulación general de la atmósfera, y otros vientos que se desencadenan a causa de los cambios meteorológicos locales. Algunos de estos últimos son periódicos, otros no; algunos afectan grandes regiones de la tierra, otros tienen un ámbito de actuación muy limitado.

Las condiciones topográficas de la Tierra hacen que haya vientos producidos por pequeñas alteraciones regionales. Por ejemplo, las brisas de tierra, aire fresco del mar hacia tierra durante el día, y las brisas de mar, aire fresco que viaja de la tierra al mar durante la noche.

Algo parecido ocurre en las zonas de montaña. Durante el día, la brisa de montaña del valle asciende hacia las cumbres, y la brisa de valle, que desciende desde las cumbres por la noche.

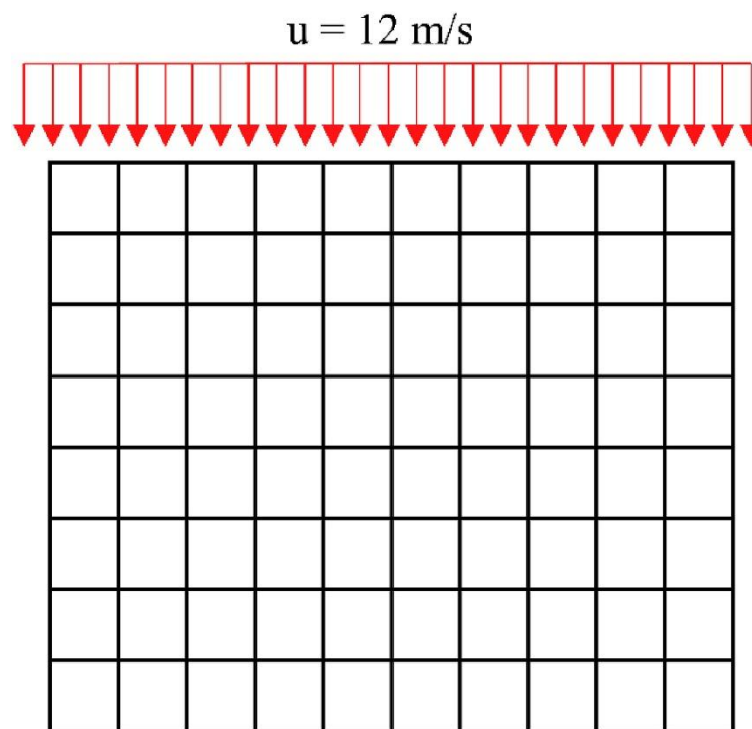


Figura 6. Condición del viento, caso 1

Fuente: (Baban y Parry, 2001)

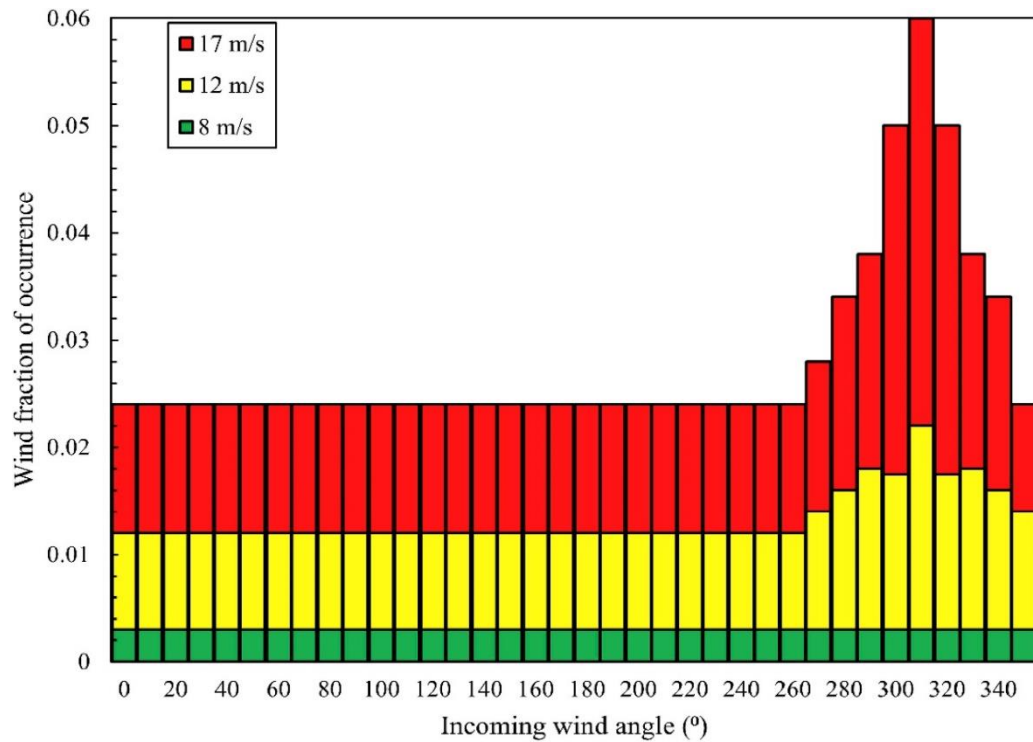


Figura 7. Distribución del viento, caso3

Fuente: (Baban y Parry, 2001)

1.1.6. Distribución de la probabilidad de Weibull

El cálculo estadístico de la energía eólica requiere el conocimiento de la distribución de las velocidades del viento en un sitio determinado. Una determinación correcta de la distribución de probabilidad para los valores de velocidad del viento es muy importante para evaluar la energía de velocidad del viento en una región. Aunque se aplican diferentes modelos de distribución de la velocidad del viento para adaptarse a la velocidad del viento durante un período de tiempo, la función Weibull de dos parámetros se acepta como la técnica más popular. Es utilizado ampliamente por investigadores involucrados en el análisis de la velocidad del viento y la energía eólica durante muchos años (Wais, 2017). El método de la distribución de Weibull es uno de los métodos altamente aceptables que permiten predecir la velocidad del viento en condiciones reales, en la Figura 8 y 9 se muestra la función de densidad y acumulada de probabilidad de la distribución de Weibull.

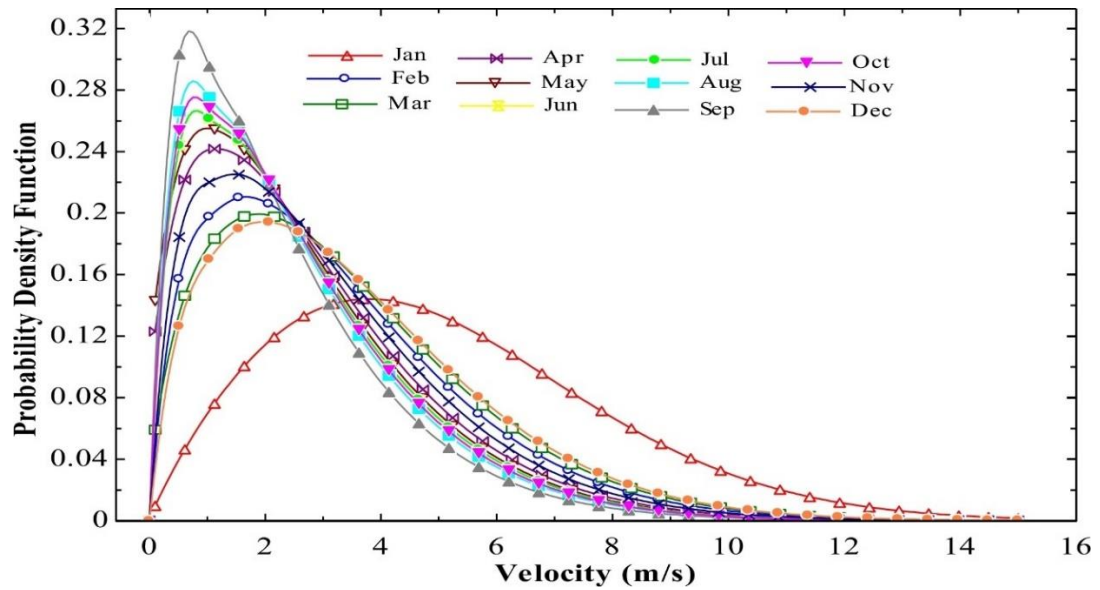


Figura 8. Función densidad de la probabilidad de la distribución de Weibull

Fuente: (Aririguzo y Ekwe, 2019)

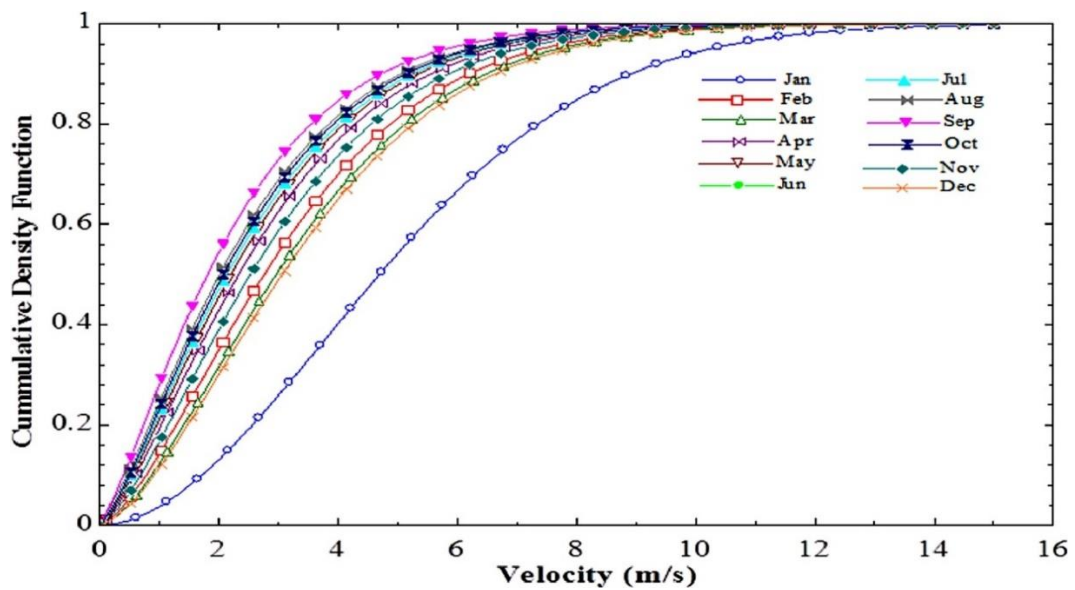


Figura 9. Función densidad acumulada de la distribución de Weibull

Fuente: (Aririguzo y Ekwe, 2019)

1.1.7. Distribución de la probabilidad de Weibull de dos parámetros

La Función de densidad de la probabilidad de Weibull de dos parámetros se expresa mediante la ecuación (1):

$$p(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1)$$

Dónde: v es la velocidad del viento y $v > 0; k > 0, A > 0$.

Factor sin dimensiones k determina la forma de la curva y se llama factor de forma. Parámetro A , en m/s, es el parámetro de escala. Las distribuciones toman diferentes formas con diferentes valores de k y A .

La energía disponible en el viento también puede estimarse utilizando la función de densidad de probabilidad de Weibull, mostrado en la Figura 10. Una vez que las velocidades del viento y su distribución estén disponibles, entonces sabremos la probabilidad $p(v)$ para lo cual la velocidad del viento es v , la energía eólica total disponible se puede escribir como la ecuación (2):

$$P_{AVAIL} = \int_0^{\infty} P_v \cdot p(v) \cdot dv \quad (2)$$

La velocidad del viento cambia continuamente, por lo que es necesario describirlo de forma estadística.

Es conveniente establecer un modelo de las frecuencias de las velocidades del viento que venga descrito por una función matemática continua en vez de por una tabla de valores discretos.

Hay varias funciones que se pueden utilizar para describir la frecuencia de la distribución de velocidades del viento. Las más utilizadas son las funciones de Weibull y Rayleigh.

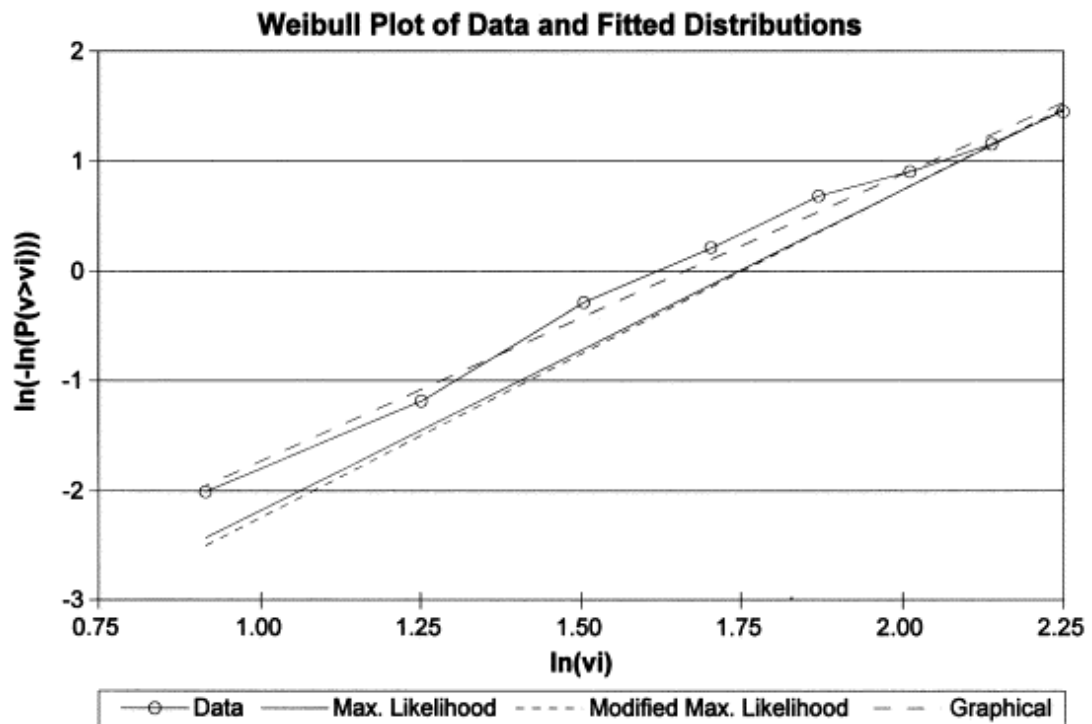


Figura 10. Gráfica de Weibull del conjunto de datos de muestra junto con las distribuciones de Weibull ajustadas por cada método

Fuente: (Seguro y Lambert, 2000)

1.1.8. Rosa de Viento

La rosa de los vientos consiste en un círculo donde hay marcados los 32 rumbos en que suele dividir la circunferencia del horizonte rosa de los vientos. Las cuatro divisiones fundamentales son las orientaciones más conocidas: norte, sur, este y oeste. Por tanto, el horizonte queda dividido en 4 partes de 90° cada una. Estas 4 partes se vuelven a dividir, creando los rumbos u orientaciones laterales: noreste, sureste, sur este y noroeste. Finalmente, hay todavía una división más, que acaba de concretar el rumbo. De esta última división surgen los rumbos colaterales, son: Norte-noreste, este-noreste, este-sureste, sur-sureste, sur-suroeste, oeste-suroeste, oeste-noroeste y norte-noroeste (Figura 11). Aunque parezca envuelto si lo leemos, en la imagen podemos ver de manera fácil y gráfica a que nos referimos (Valencia Ochoa *et al.*, 2019).

La información de cada rosa de viento muestra la frecuencia de ocurrencia de los vientos en 16 sectores de dirección (E, ENE, NE, NNE, W, WNW, NW, NNW, ESE, SE, SSE, S, SSW, N, WSW, SW) y en clases de velocidad del viento para una lugar

y un periodo de tiempo dado, la clasificación más utilizada para el viento es la ESCALA BEAUFORT.

Para construir una rosa de vientos se siguen los mismos pasos que al hacer una tabla de frecuencias, una categoría es la dirección y sus subcategorías son los 16 rumbos, la otra categoría es la velocidad y los diferentes tipos de viento considerados por Beaufort como las subcategorías.

La circunferencia polar es una base de datos gráfica, que representa en la dirección de viento las concentraciones alcanzadas en función de las horas del día. De esta forma, se puede ver a qué horas del día se producen las mayores concentraciones y en qué dirección del viento se producen de forma mayoritaria.

Características y funciones de la rosa de los vientos actual:

- Se trata de un signo independiente a cualquier otro elemento iconográfico.
- En los mapas ocupa una posición visualmente relevante.
- Es el único elemento ornamental destinado a indicar la orientación de los vientos.
- Cada punta señala el nombre del viento al que corresponde (los vientos se diferencian según la dirección desde la que soplan).

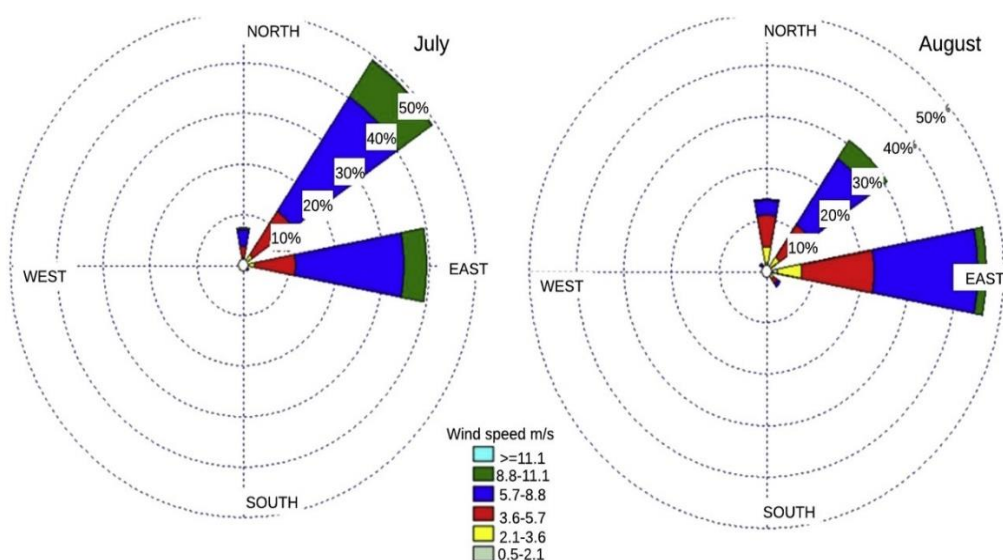


Figura 11. Rosa de viento de puerto Bolívar

Fuente: (Valencia Ochoa *et al.*, 2019)

1.1.9. Características de la velocidad del viento

El viento está presente en forma natural y posee un gran potencial para el aprovechamiento humano (Figura 12). Puede clasificarse según su escala espacial, su velocidad, los tipos de fuerzas que lo ocasionan, las zonas en donde se produce y sus efectos.

Si se toma como base la clasificación que se usa en meteorología, los vientos pueden ser ráfagas si son de alta velocidad y turbonadas si son fuertes y duran aproximadamente 1 minuto. De acuerdo con su fuerza media, los vientos de larga duración se consideran brisa, vendaval, tormenta, huracán o tifón.

La escala Beaufort se encarga de dividir el viento en 17 niveles, con base en su velocidad. Por ejemplo, si la velocidad de un viento es de 0 a 1 kilómetro por hora, se denomina calma. Si es de 62 a 74 kilómetros por hora es un temporal, y si su velocidad está por encima de los 118 kilómetros por hora, corresponde a un huracán.

Pasando ahora a conocer la dirección del viento debemos de tomar en cuenta que este factor depende de otras características, es decir, la dirección siempre será modificada con respecto a la distribución de los puntos de presión en el planeta, ya que en todos los casos se presenta el traslado del viento desde las áreas con mayor presión y finalizan en las de menor presión.

Continuando de esta manera se ha determinado que la dirección del viento es en general el punto de donde proviene gracias a la presión que ha recibido, o a la fuerza que ha tomado. Se podría decir que cuando nos referimos a dirección del viento estamos hablando de la procedencia del mismo, y se distingue gracias a los puntos cardinales a fin de especificar su rumbo, es decir, norte, sur, este y oeste.

Un aspecto determinante en la dirección del viento es la presión atmosférica, que no es más que la presión que ejerce el aire en un punto determinado de la atmósfera.

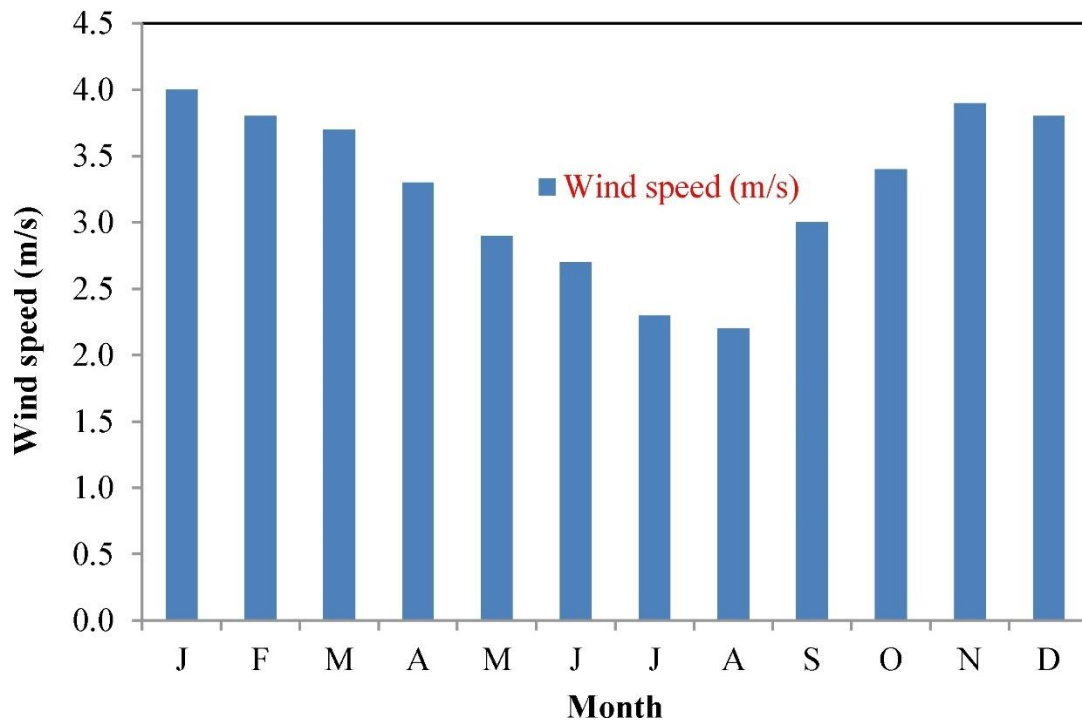


Figura 12. Variación mensual de la velocidad media del viento en Faya-Largeau, Chad

Fuente: (Soulouknga *et al.*, 2018)

1.1.10. Sistema eólico conectado a red mediante simulación

Un sistema de generación eólica se puede interconectar a la red pública, conllevando a un sistema de generación distribuida. Sin embargo, los requisitos de conexión a la red pública varían, según en la escala de generación donde se encuentren (Mohseni y Islam, 2011). Un aerogenerador conectado a red este compuesto por (Figura 13):

- Un generador de imanes permanentes.
- Un inversor de AC/DC para igual la tensión de generación.
- Un sistema de filtro estabilizador.
- Un inversor de DC/AC para la inyección a la red pública.
- Un transformador para conectar a la red pública.

Directrices para integrarse al sistema de transmisión o distribución:

- Nivel de compatibilidad del voltaje.
- Nivel de compatibilidad de frecuencia.
- Nivel de compatibilidad de distorsión armónica.
- Nivel de compatibilidad de emisiones de parpadeo de voltaje.

- Sistema de puesta a tierra.
- Velocidad de respuesta ante una falla.

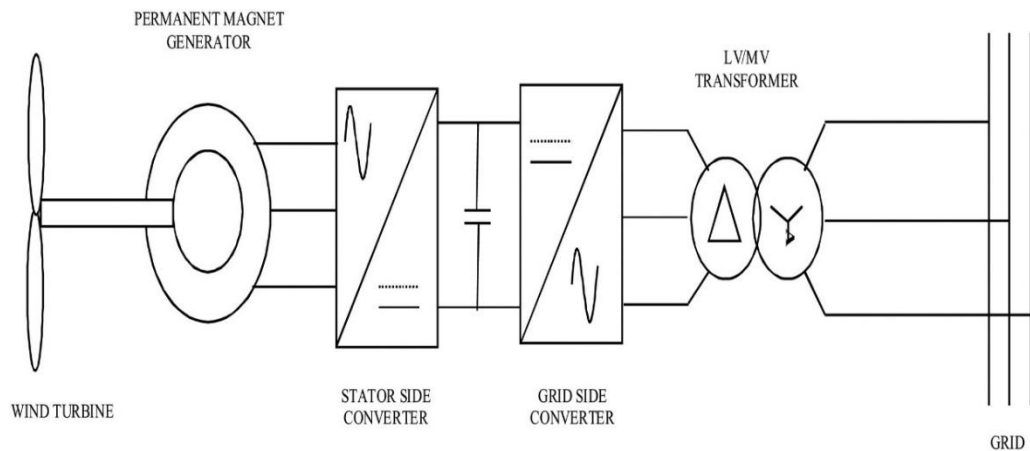


Figura 13. Sistema eólico interconectado a red

Fuente: (Nobela *et al.*, 2019)

a) Generación de corriente alterna (CA) a frecuencia variable:

La mayoría de aerogeneradores funcionan a una velocidad casi constante con conexión directa a red. Sin embargo, con conexión indirecta a red, el generador de la turbina eólica funciona en su propia mini-red separada de corriente alterna, como se ilustra en el gráfico. Esta red está controlada electrónicamente (utilizando un inversor), por lo que puede variarse la frecuencia de la corriente alterna en el estator del generador. De esta forma se puede hacer funcionar la turbina a una velocidad de giro variable. Así pues, la turbina generará corriente alterna exactamente a la frecuencia variable aplicada al estator.

El generador puede ser bien un generador síncrono o un generador asíncrono, y la turbina puede tener una caja multiplicadora, como en la imagen de arriba, o no tenerla, si el generador tiene muchos polos, como se explica en la página siguiente.

b) Conversión a corriente continua (CC)

La corriente alterna de frecuencia variable no puede ser tratada en la red eléctrica pública. Debemos, por tanto, rectificarla, es decir, convertirla en corriente continua (CC). La conversión de corriente alterna de frecuencia variable a

corriente continua puede hacerse utilizando tiristores o grandes transistores de potencia.

c) Conversión a corriente alterna de frecuencia fija

Posteriormente convertimos la corriente continua (fluctuante) a corriente alterna (utilizando un inversor) de exactamente la misma frecuencia que la de la red eléctrica pública. Esta conversión de corriente alterna en el inversor también puede hacerse utilizando tiristores o transistores.

Los tiristores o transistores de potencia son grandes interruptores de material semiconductor que funcionan sin partes mecánicas. A primera vista, la clase de corriente alterna que se obtiene de un inversor tiene un aspecto bastante feo (nada que ver con la suave curva sinusoidal que aprendimos cuando estudiábamos corriente alterna). En lugar de eso, lo que se tiene es una serie de saltos bruscos en la tensión y en la corriente, como puede verse en la animación de arriba.

d) Filtrado de la corriente alterna

Sin embargo, las formas de onda rectangulares pueden ser suavizadas utilizando las inductancias y condensadores apropiados, en lo que se da en llamar filtro. Sin embargo, la apariencia más o menos dentada de la tensión no desaparece completamente, tal y como se explica más abajo.

e) Ventajas de la conexión indirecta a red: velocidad variable

La ventaja de la conexión indirecta a red es que permite hacer funcionar la turbina eólica a velocidad variable.

La principal ventaja es que permite que el rotor gire más rápidamente durante ráfagas de viento, y almacenar así parte del exceso de energía en forma de energía rotacional hasta que la ráfaga haya terminado. Obviamente, esto requiere de una estrategia de control muy inteligente, pues debemos ser capaces de distinguir entre ráfaga y altas velocidades de viento en general. De esta forma es posible reducir el par máximo (reduciendo así deterioro del multiplicador y del generador), así como las cargas de fatiga en la torre y en las palas del rotor.

La ventaja secundaria es que con la electrónica de potencia se puede controlar la potencia reactiva (es decir, el desfase de la corriente respecto a la tensión en la red de corriente alterna), y así mejorar la calidad de potencia de la red eléctrica. Esto puede ser particularmente útil en turbinas funcionando en una red eléctrica débil.

Teóricamente, la velocidad variable también supone una ligera ventaja en términos de producción anual, puesto que permite hacer funcionar una máquina a la velocidad óptima de giro, dependiendo de la velocidad del viento. Sin embargo, desde el punto de vista económico la ventaja es tan pequeña que apenas merece la pena mencionarlo.

f) Desventajas de la conexión indirecta a red

La desventaja básica de la conexión indirecta a red es el coste. Como acabamos de ver, la turbina necesitará un rectificador y dos inversores, uno para controlar la corriente del estator, y el otro para generar la corriente de salida. Actualmente, parece ser que el coste de la electrónica de potencia excede a los beneficios que reporta el hecho de construir turbinas más ligeras, aunque esto puede cambiar cuando el coste de la electrónica de potencia disminuya. Mirando las estadísticas de operación de aerogeneradores con electrónica de potencia, parece también que las tasas de disponibilidad de estas máquinas están por debajo de las de las máquinas convencionales, debido a fallos en la electrónica de potencia.

Otras desventajas son la pérdida de energía en el proceso de conversión CA-CC-CA, y el hecho de que la electrónica de potencia puede introducir distorsión armónica de la corriente alterna en la red eléctrica y, por tanto, reducir la calidad de potencia.

La distorsión armónica se produce porque el proceso de filtrado mencionado arriba no es perfecto, y puede dejar algunos "tonos agudos" (múltiplos de la frecuencia de la red) en la corriente de salida.

1.2. Antecedentes

La escasez en la producción de energía y el uso masivo de la energía en el mundo, contribuyen al cambio climático y calentamiento global (Dai *et al.*, 2020; Ivanovski *et al.*, 2020), por efecto del uso masivo de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural o carbón, causantes por la emisión gran cantidad de gases de efecto invernadero a la atmosfera (Vural, 2020), afectando la estructura de la vegetación de árboles y la dinámica del desarrollo de bosques (Garbolino *et al.*, 2021), impactando negativamente al medio ambiente (Sözer y Sözen, 2019).

Debido al crecimiento de la población, el avance tecnológico y otros factores, la necesidad energética aumenta, siendo insuficiente el uso de hidrocarburos para cubrir esta demanda, además que contaminan al medio ambiente, por lo tanto, es necesario buscar otras fuentes de energía alternativa que sean amigables con el medio ambiente (Karatop *et al.*, 2020). Las energías renovables constituyen un factor fundamental para el desarrollo energético y sostenible de la humanidad (Wang y Liu, 2020), pudiendo ser una opción para reducir los problemas de cambio climático y evitando quemar combustibles fósiles (Mohd Chachuli *et al.*, 2021), cubriendo parte de la demanda de energía, principalmente la energía solar y eólica, por la abundancia de la radiación solar y continuidad moderada de la velocidad del viento a nivel mundial (Praveen *et al.*, 2020).

La energía eólica, es parte de las energías renovables, gratuita, inagotable y no contaminante, que experimento un gran crecimiento en los últimos años (Gao *et al.*, 2020; Mostafaeipour *et al.*, 2020), debido a la implementación de políticas energéticas competitivas con las fuentes de energía convencionales y la sostenibilidad al medio ambiente (Dorrell y Lee, 2020). La producción de energía depende de la variabilidad del viento y dirección (Wang *et al.*, 2020), distribución temporal y espacial del viento en zonas planas y montañosas (Zhang *et al.*, 2020), las condiciones climáticas y las fluctuaciones meteorológicas de la zona (Drücke *et al.*, 2021). Por ello la energía eólica puede contribuir a una generación sostenible de electricidad y una económica baja en carbono (Höltinger *et al.*, 2016).

Los aerogeneradores convierten la energía del viento en electricidad por la rotación de las palas mecánicas (Sang *et al.*, 2020), compuesto de una turbina eólica y un generador eléctrico, influenciado por factores de velocidad del viento y disponibilidad de la turbina (Kan *et al.*, 2020), por lo general es controlado por el seguimiento de punto máxima

potencia (MPPT), para alcanzar la máxima potencia en cualquier velocidad y dirección del viento (Sun *et al.*, 2020), hasta un máximo de 59.3 % de la energía cinética del viento por el límite del coeficiente de Betz (Siavash *et al.*, 2020). Estos sistemas son instalados como parques eólicos marinos o terrestres (Bórawski *et al.*, 2020).

La función de distribución Weibull, es el modelo más aproximado para la estimación de la velocidad del viento (Shu *et al.*, 2015) y la determinación del potencial de la energía eólica (Deep *et al.*, 2020), sin embargo los parámetros de distribución de forma (k) y escala (c) se estiman mediante métodos numéricos (Guarienti *et al.*, 2020). La función de distribución Weibull de dos parámetros es el más utilizado a nivel mundial, por su gran flexibilidad y simplicidad en la evaluación del recurso eólico de una determinada zona, durante un periodo de tiempo, por general de manera mensual o anual (Islam *et al.*, 2019; Islam *et al.*, 2011). La distribución de Weibull es una función de dos parámetros que se utiliza comúnmente para ajustar la distribución de frecuencia de la velocidad del viento. Se ha demostrado que esta familia de curvas se ajusta bien a los datos de velocidad del viento medidos. La función Weibull proporciona una representación conveniente de los datos de velocidad del viento para fines de cálculo de energía eólica. Es importante señalar que el análisis presentado aquí no considera el análisis de la velocidad del viento extrema, para esto ver (Seguro y Lambert, 2000).

La función de distribución de Weibull se utiliza para determinar el potencial de energía eólica para el sitio investigado y los parámetros de distribución de forma (k) y escala (c) se estiman mediante métodos numéricos. Akdağ y Dinler (Akdağ y Dinler, 2009) en su estudio desarrollaron un método para estimar los parámetros de distribución de Weibull para aplicaciones de energía eólica llamado método de densidad de potencia. Los autores también aplicaron otros tres métodos en el estudio: métodos gráficos, de máxima verosimilitud y de momento. Chang y col. (Chang *et al.*, 2003) utilizaron el método de máxima verosimilitud para estimar los parámetros de distribución de Weibull en un paso del estudio que tiene como objetivo estimar el recurso eólico en Taiwán.

Por lo tanto, este proyecto de investigación tiene como objetivo determinar el potencial de la energía eólica por el método de la distribución Weibull y la rosa de viento en el altiplano peruano a más de 3800 m de altitud, para la aplicación en aerogeneradores en la región de Puno. La energía eólica en la región altoandino peruano, es muy importante, por el aprovechamiento del recurso del viento, la generación de electricidad y la



sostenibilidad medio ambiental, sin embargo, este recurso eólico puede ser aprovechado por sistemas de generación eólica (turbinas de viento), de eje vertical y eje horizontal, de modo que, este sistema energético sería un vector sostenible y amigable para el medio ambiente.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

La gran demanda de energía asociado a los problemas políticos y ambientales relacionados con el uso del combustible fósil son los principales inconvenientes de este recurso energético a nivel mundial, sin embargo, en la última década se ha incrementado crecientemente la demanda de electricidad viéndose en la necesidad de usar otras fuentes de energía no convencionales que sean sostenibles al medioambiente como la energía eólica.

La demanda energética nacional está cubierta en un 54% por centrales de generación térmica según el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional SEIN, de modo que usan como energía principal el combustible fósil contaminando al medioambiente con distintos gases que son producidos por la combustión de las centrales, por el contrario, el recurso del viento es abundante en distintas regiones del país para sistemas eólicos.

La zona altiplánica, que presenta una geografía plana y el clima más variado del mundo, debido a temperaturas muy bajas y altas, temporadas con lluvias torrenciales y vientos completamente dispersos. Según el Atlas Eólico del Perú en la ciudad de Juliaca se tiene una velocidad promedio de viento anual entre (5 - 6) m/s, estando en una altitud muy elevada por encima de los 3800 m.s.n.m., donde la creciente demanda de energía eléctrica y la sostenibilidad energética para el autoconsumo del sector residencial en la generación de energía eléctrica es relevante en la evaluación del recurso del viento en sistemas eólicos para su utilización.

2.2. Enunciados del problema

2.2.1. Problema general

- a) ¿Cuál es el potencial de la energía eólica aplicando la distribución Weibull para sistemas eólicos en el Altiplano de Juliaca?

2.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuánto es la velocidad y dirección del viento promedio anual?
- b) ¿Cuál es el modelo de la distribución de Weibull de la energía eólica y la rosa de viento?
- c) ¿Cuál será la simulación del comportamiento de un sistema de generación eólico conectado a red en la producción de energía?

2.3. Justificación

La energía eólica es muy abundante en nuestro medio y gratis, siendo parte de las energías renovables; la importancia de su estudio y utilización en nuestra región es de mucho beneficio para la solución de problemas de suministro de energía eléctrica en zonas rurales o conectadas a la red eléctrica en zonas urbanas gracias al recurso del viento. Por ser un tipo de energía limpia y renovable podemos evitar la contaminación medio ambiental y reducir el costo de la tarifa eléctrica por parte de las empresas prestadoras de servicio de suministro eléctrico en la zona sur de Puno beneficiando a la región Altiplánica.

Con el estudio de la energía eólico en la ciudad de Juliaca de la región Puno, se podrá determinar la velocidad promedio anual y la rosa de viento, estos resultados se usaran para el diseño de sistemas eólicos autónomos en el sector residencial y sistemas eólicos conectados a red en pequeña y gran escala para la producción de energía eléctrica, disminuyendo los costos de operación en la tarifa eléctrica tanto en la vivienda por parte de la suministradora de energía eléctrica, siendo una tecnología muy amigable para el medio ambiente por no generar CO₂ en el proceso de generación eléctrica sino aprovechando la velocidad del viento provenientes de los cambios de temperatura del planeta tierra para convertirlos en energía eléctrica en corriente continua, usando acumuladores o inversores.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

- a) Evaluar el potencial de la energía eólica aplicando la metodología de la distribución de Weibull para sistemas eólicos en el Altiplano de Juliaca.

2.4.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la velocidad y dirección del viento promedio anual.
- b) Estimar el modelo de la energía eólica aplicando la distribución de Weibull y la rosa de viento.
- c) Simular el comportamiento de un sistema eólico conectado a red para la producción de energía.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

- a) La frecuencia de la velocidad del viento determina el potencial de la energía eólica en el Altiplano de Juliaca para la aplicación de sistemas eólicos.

2.5.2. Hipótesis específicas

- a) La velocidad medio del viento y dirección anual es relevante en la zona altiplánica de Puno, siendo significativo para sistemas eólicos en la producción de energía.
- b) La función densidad y la distribución de Weibull determinan el comportamiento del viento en el Altiplano de Juliaca, mientras tanto la rosa de viento está en función a la velocidad y dirección del viento.
- c) Un sistema eólico conectado a red mediante una simulación, produce energía significativa en el Altiplano de Puno.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Juliaca, región de Puno, Perú, ubicado a una latitud de $-15^{\circ} 29' 27''$ y una longitud de $-70^{\circ} 07' 37''$, a 3824 m de altitud, al noroeste del lago Titicaca en el altiplano peruano. Conformado por un relieve plano compuesto por extensas pampas con leves ondulaciones (Figura 14). La temperatura media es de 4°C a 10°C , la temperatura máxima durante todos los meses es con una media de 18.08°C y la temperatura mínima alcanza los -7.5°C en el mes de julio.

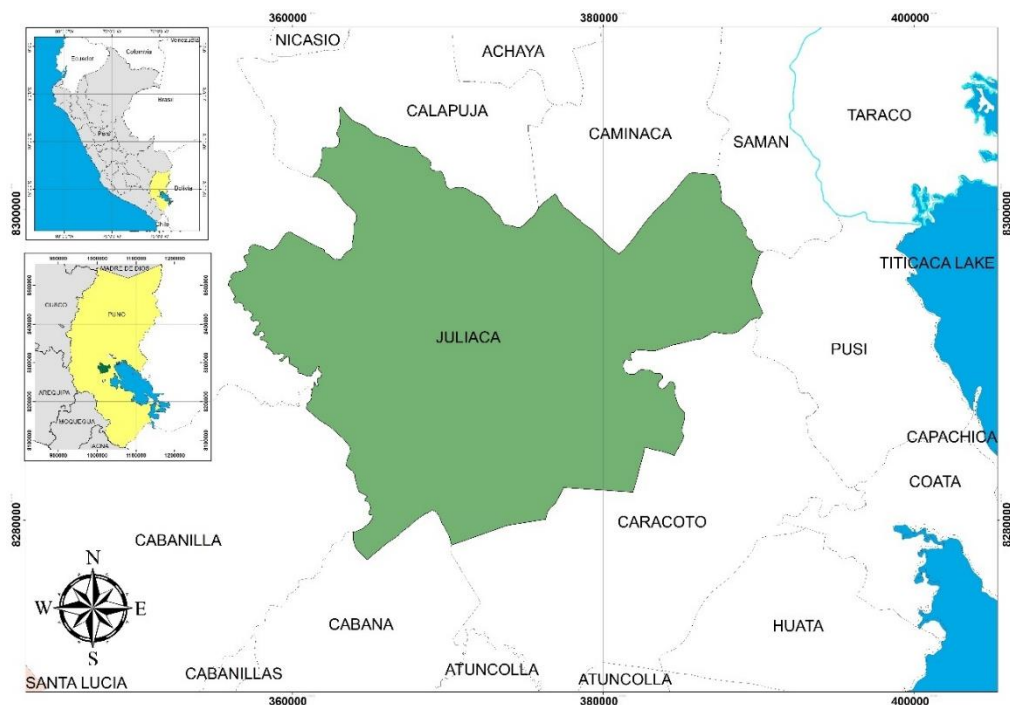


Figura 14. Ubicación geográfica de la zona de estudio en el Altiplano de Juliaca

3.2. Población

La población comprende a todos los sistemas con aerogeneradores simulados en la ciudad de Juliaca, para determinar el comportamiento de operación y producción energética, con la variación de la velocidad del viento y la dirección evaluados durante un año en condiciones climáticas variadas del Altiplano de Puno.

3.3. Muestra

La muestra del presente proyecto de investigación, es considerara la estación meteorológica instalada estratégicamente de la ciudad de Juliaca, para evaluar y determinar el potencial del recurso eólico en esta zona. Además, del aerogenerador eólico, para determinar la producción energética de potencia, energía y rendimiento en condiciones climáticas variadas.

3.4. Métodos de investigación

Se detallan los siguientes métodos de investigación:

3.4.1. Materiales y equipos

Para realizar la medición de parámetros meteorológicos en el altiplano peruano de Juliaca, se utilizó una estación meteorológica profesional Ambient Weather WS-2902C, ubicada a 10 m de altitud en la ciudad altoandina de Juliaca, que permite monitorear las condiciones climáticas en zonas exteriores. La estación meteorológica mide la velocidad del viento, la dirección del viento, las precipitaciones, la temperatura, la humedad exterior, la radiación solar y los rayos ultravioleta. También, se utilizó un anemómetro Mini Vane – AMPROBE – USA, (Figura 15).



Figura 15. Anemómetro digital Mini Vane AMPROBE-USA

3.4.2. Método de investigación por el modelo de la distribución de Weibull

Para estimar el potencial de la energía eólica en la región altoandina, se adoptó la metodología de la función de probabilidad de la distribución Weibull de dos parámetros, con buena relación en los datos experimentales (Guarienti *et al.*, 2020; Soulouknga *et al.*, 2018), expresada en las ecuaciones (3) y (4) (Aririguzo y Ekwe, 2019).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (3)$$

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Donde, k es el parámetro de forma, c es el parámetro de escala y (v) es la velocidad del viento en (m/s). $F(v)$ representa la función de distribución acumulativa y $f(v)$ la función densidad de probabilidad. El parámetro k determina el ancho y forma de la

curva con el pico de la distribución del viento, y c describe el régimen del viento en la $f(v)$ y $F(v)$.

Este modelo de la distribución de Weibull es muy utilizado por muchos investigadores, aplicado a múltiples disciplinas de la ingeniería, siendo muy utilizado para estimar el potencial de la energía eólica en diversas zonas del mundo.

3.4.3. Estimación de parámetros Weibull

Para modelar la estimación apropiada de parámetros Weibull, se utilizó la velocidad media por hora del viento (V_m) y la varianza (σ^2) de los datos, que se transformaron de la velocidad del viento por minuto a velocidad media por hora (Shu *et al.*, 2015), por un periodo estacional anual, desde el mes de octubre del 2019 hasta el mes de setiembre del 2020, mostrados en la ecuación (5) y (6).

$$V_m = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n V_i \right] \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2 \quad (6)$$

Sin embargo, la curva de la función de distribución acumulativa $F(v)$, mostrado en la ecuación (2), se puede linealizar, obteniéndose la ecuación de una recta de la siguiente forma (multiplicándose por logaritmos), mostrados en las ecuaciones (7, 8, 9 y 10), obteniéndose la distribución de Weibull, aplicado para determinar el potencial de la energía eólica.

$$\ln(1 - F(v)) = \ln \left(e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \right) \quad (7)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(v))) = \ln \left(\frac{v}{c} \right)^k \quad (8)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(v))) = k(\ln(v) - \ln(c)) \quad (9)$$

$$\underbrace{\ln(-\ln(1 - F(v)))}_{Y_N} = \underbrace{k \ln(v)}_{m(x)} - \underbrace{k \ln(c)}_b \quad (10)$$

En tal sentido, la ecuación (8) muestra la linealización de la $F(v)$ de la distribución de Weibull, de esa forma se calcula los parámetros de forma y escala por cada mes

durante un periodo de un año, determinándose el potencial eólico en la ciudad de Juliaca.

3.4.4. Parámetros Weibull, frecuencia Relativa y Acumulada

Para determinar el potencial de la velocidad del viento se ordenaron los datos por rangos y frecuencias (Relativa y acumulada), mostrados en las Figuras (16 al 39). Desde el mes de octubre del 2019 hasta el mes de setiembre del 2020. Estas figuras representan la acumulación de la velocidad del viento del rango de (1 a 12) m/s, durante las 24 horas en la ciudad de Juliaca.

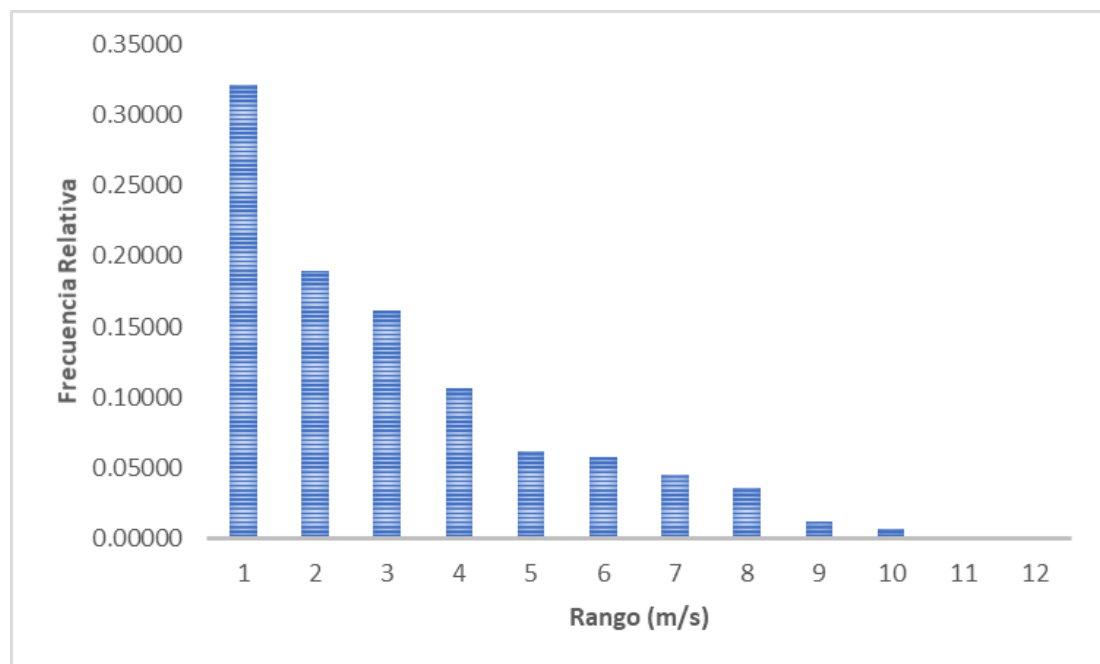


Figura 16. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de octubre del 2019

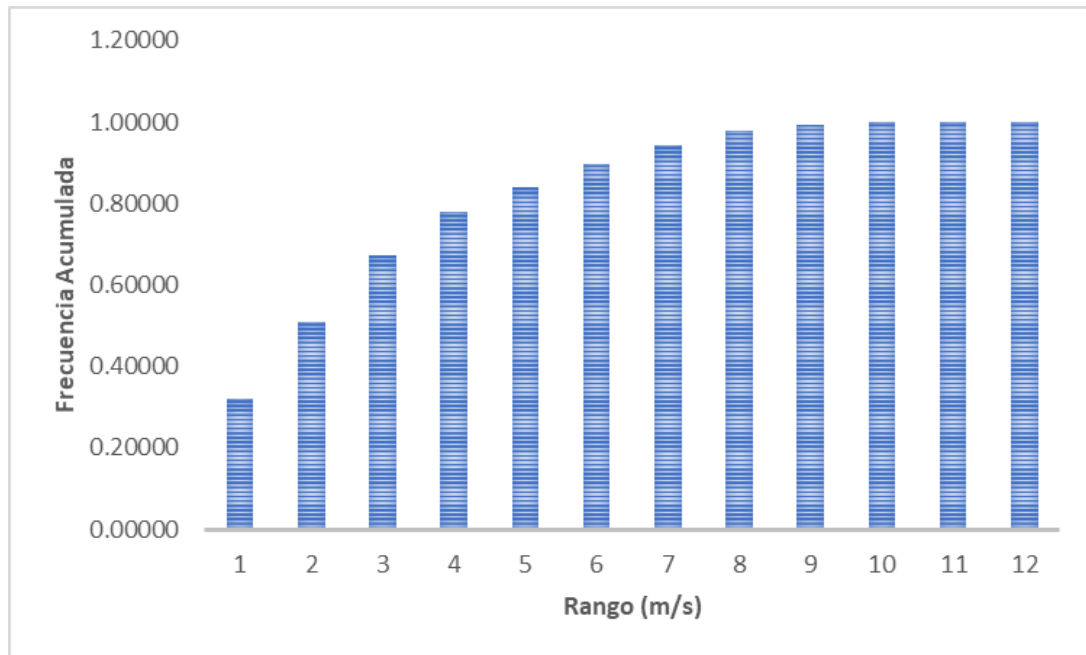


Figura 17. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de octubre del 2019

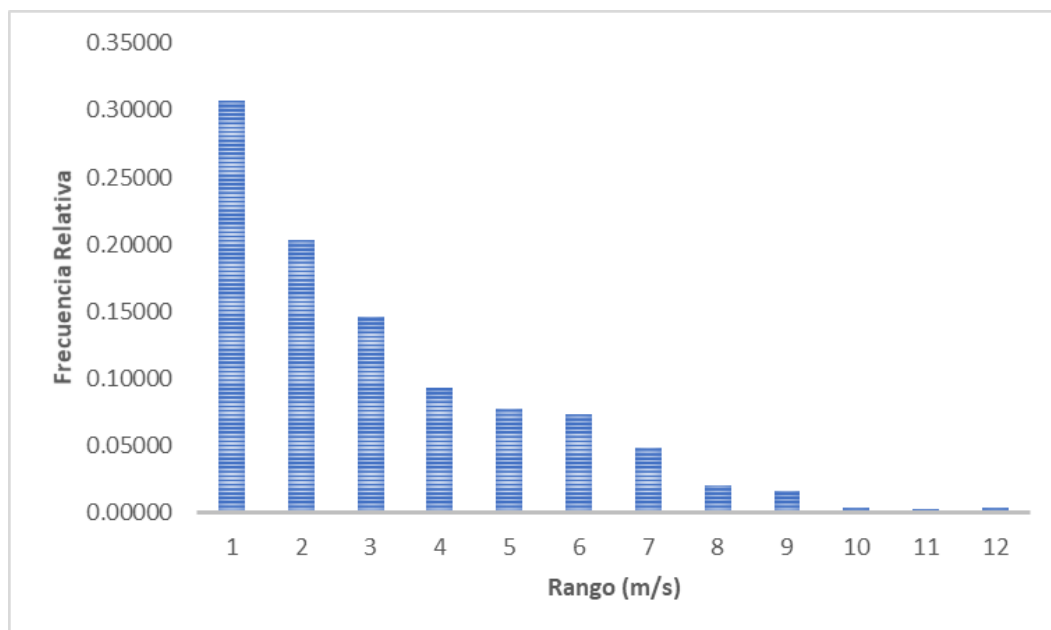


Figura 18. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de noviembre del 2019

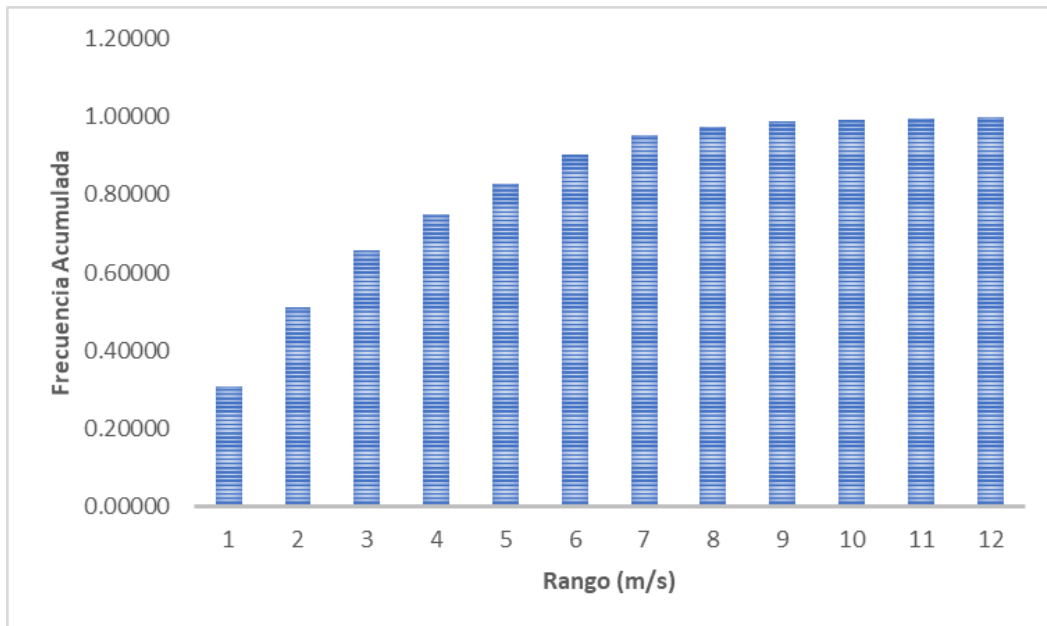


Figura 19. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de noviembre del 2019

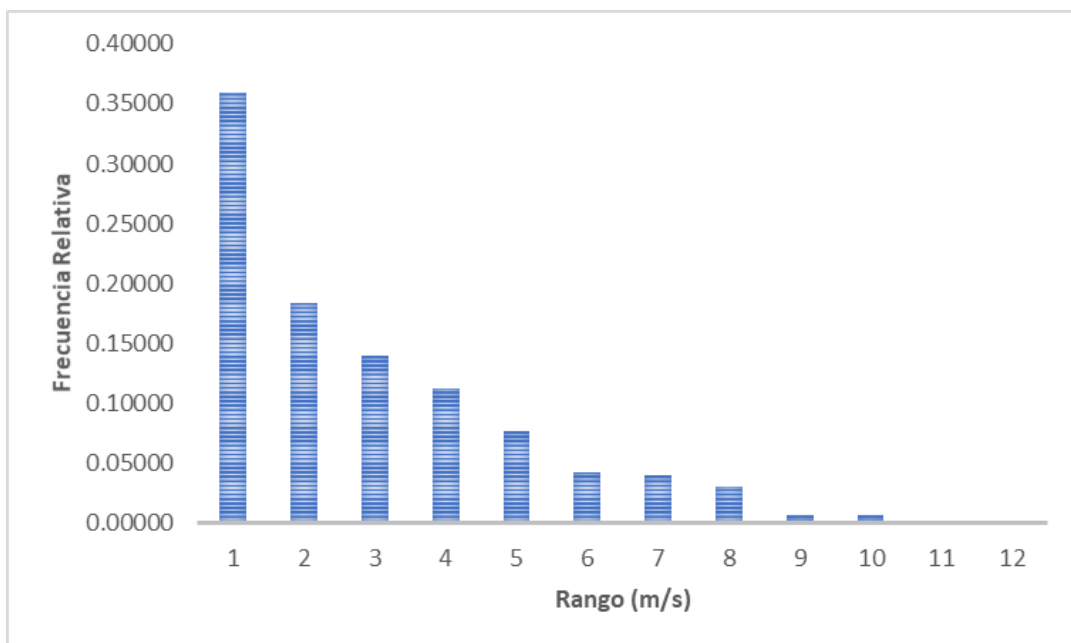


Figura 20. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de diciembre del 2019

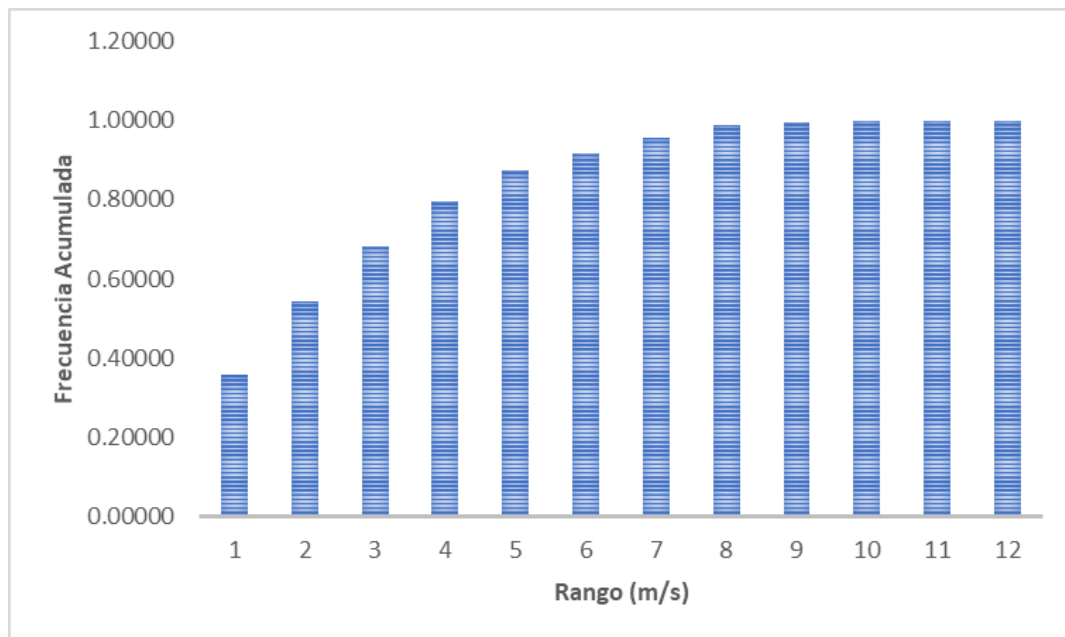


Figura 21. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de diciembre del 2019

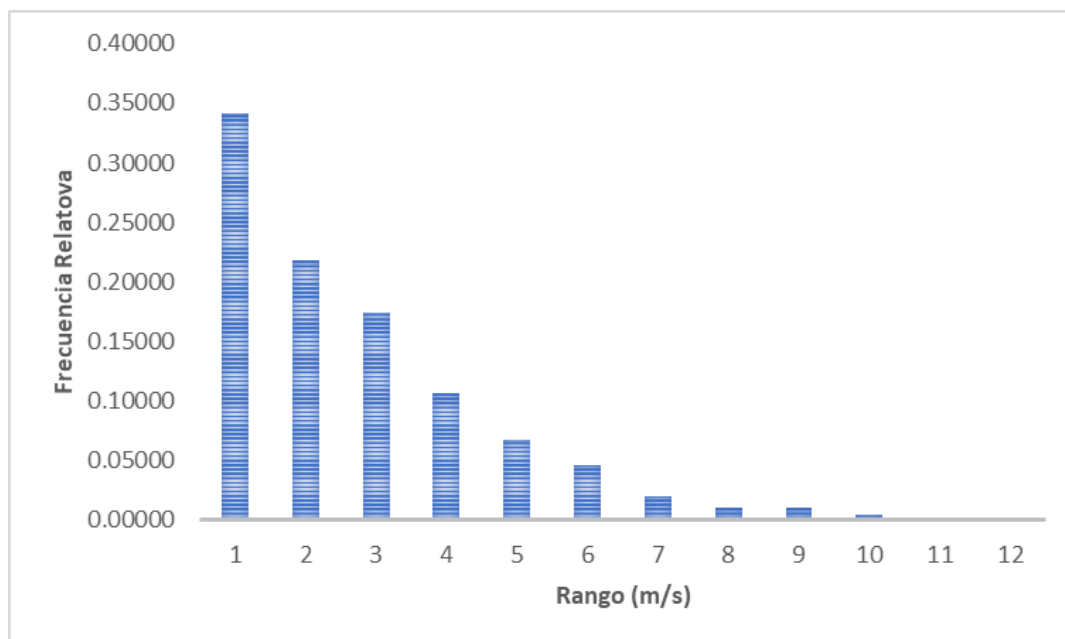


Figura 22. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de enero del 2020

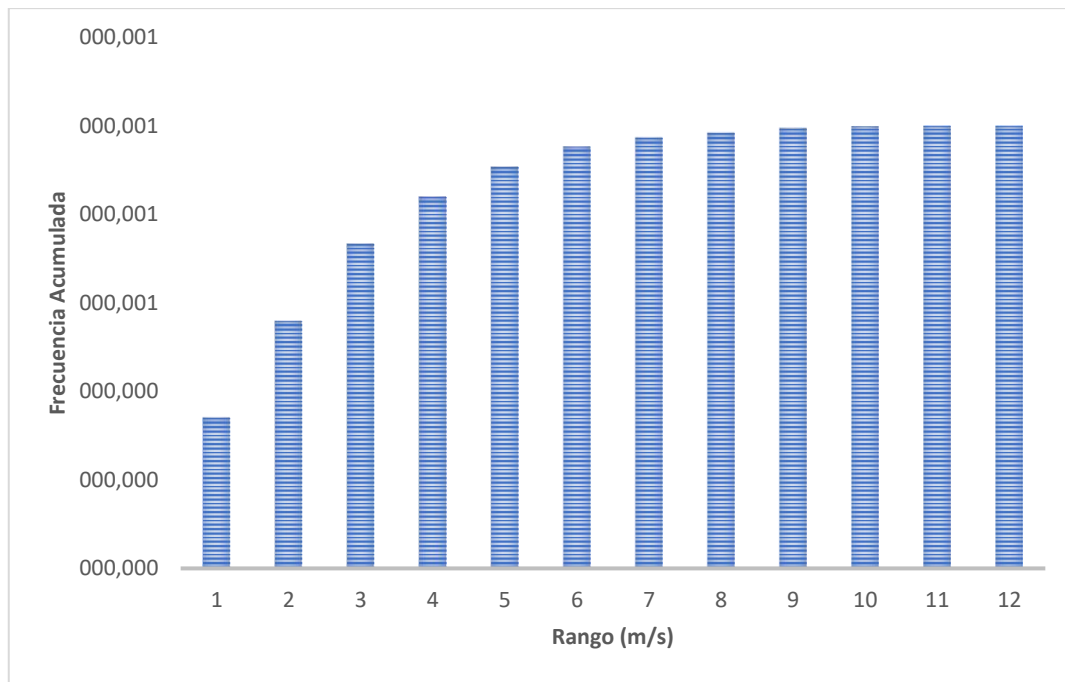


Figura 23. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de enero del 2020

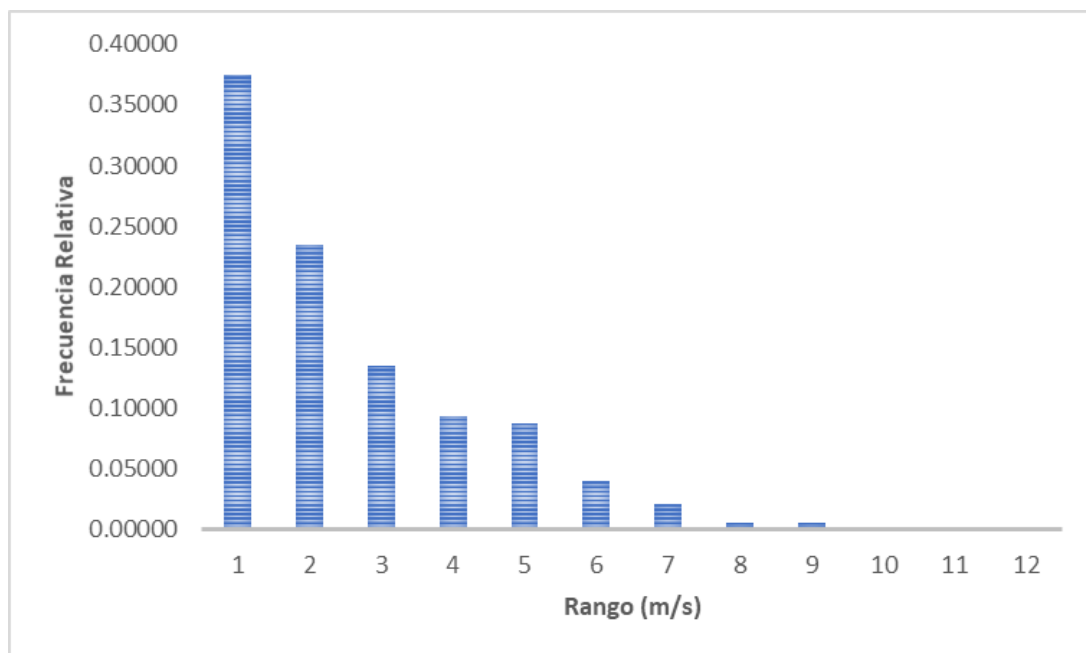


Figura 24. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de febrero del 2020

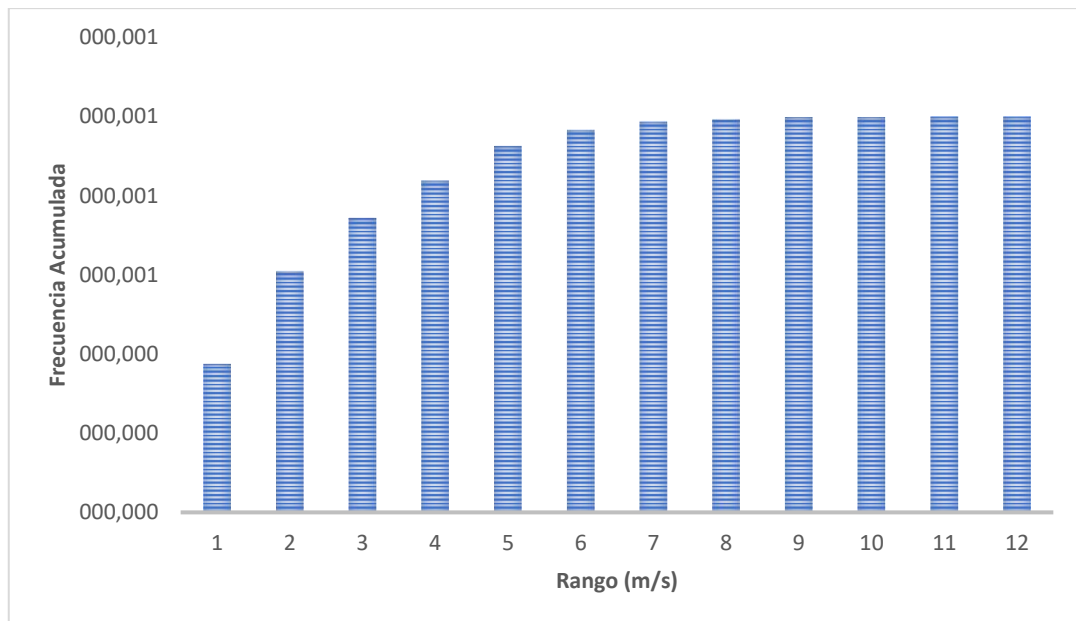


Figura 25. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de febrero del 2020

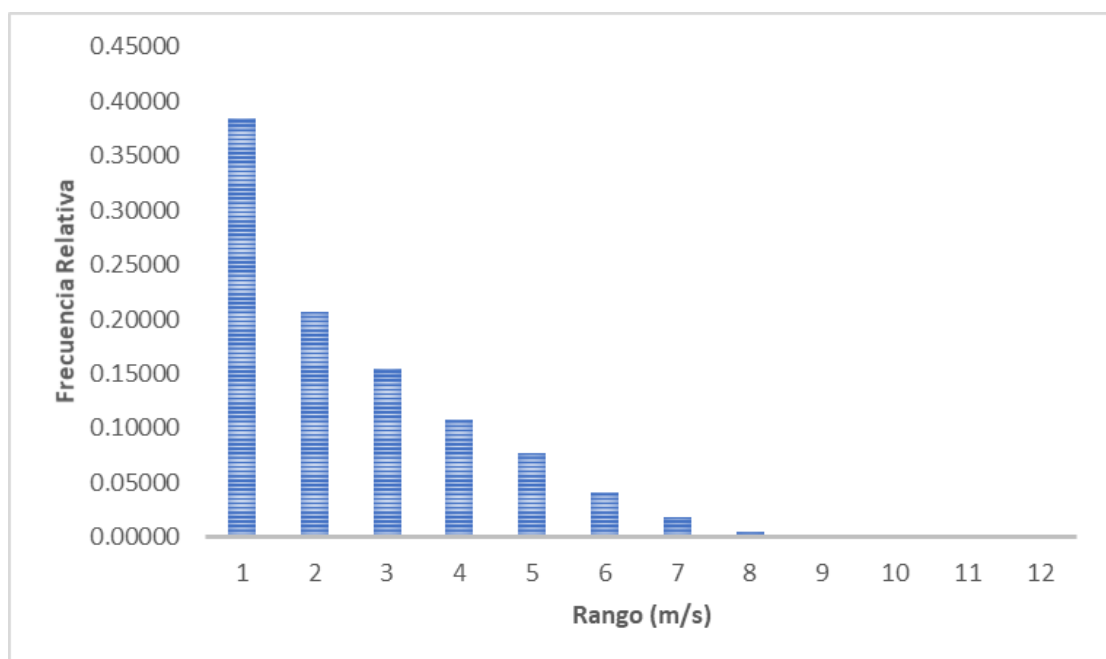


Figura 26. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de marzo del 2020

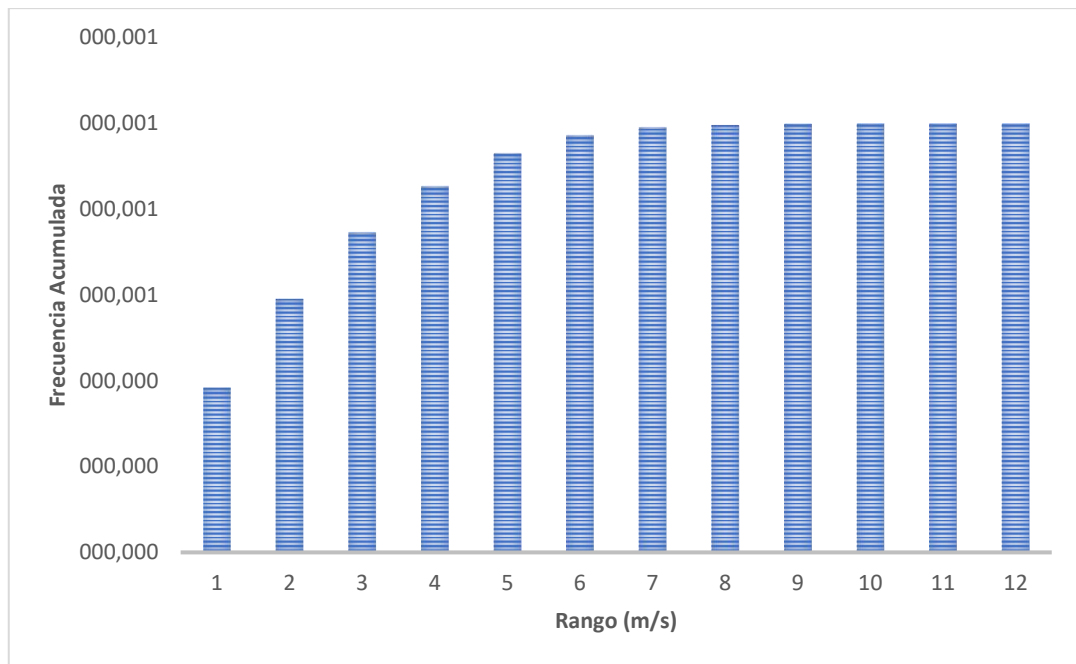


Figura 27. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de marzo del 2020

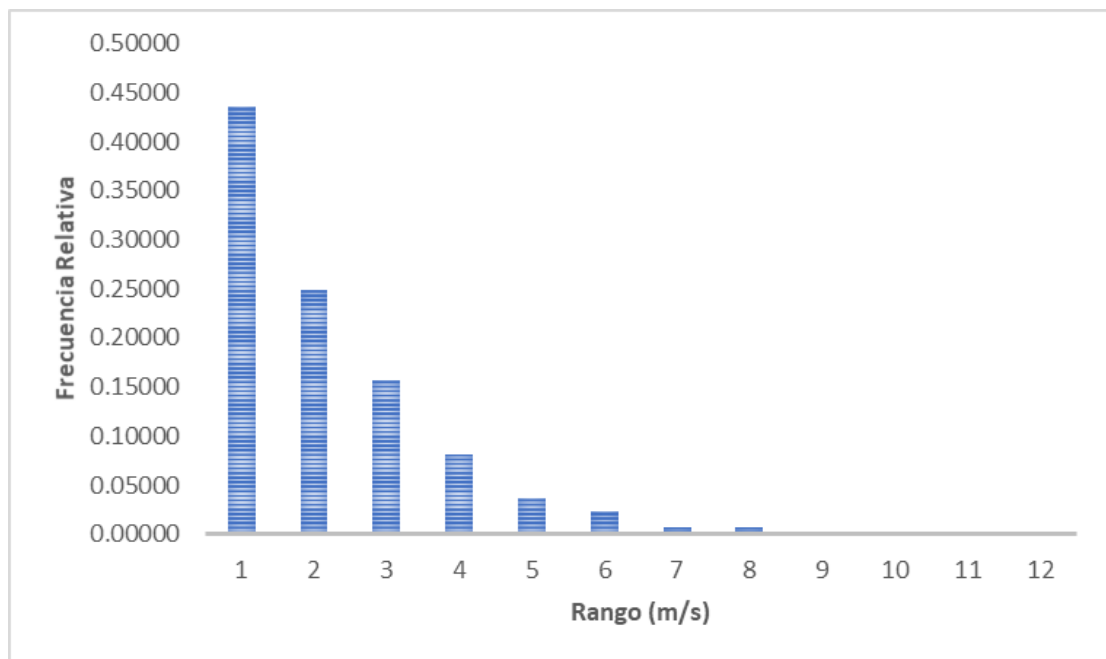


Figura 28. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de abril del 2020

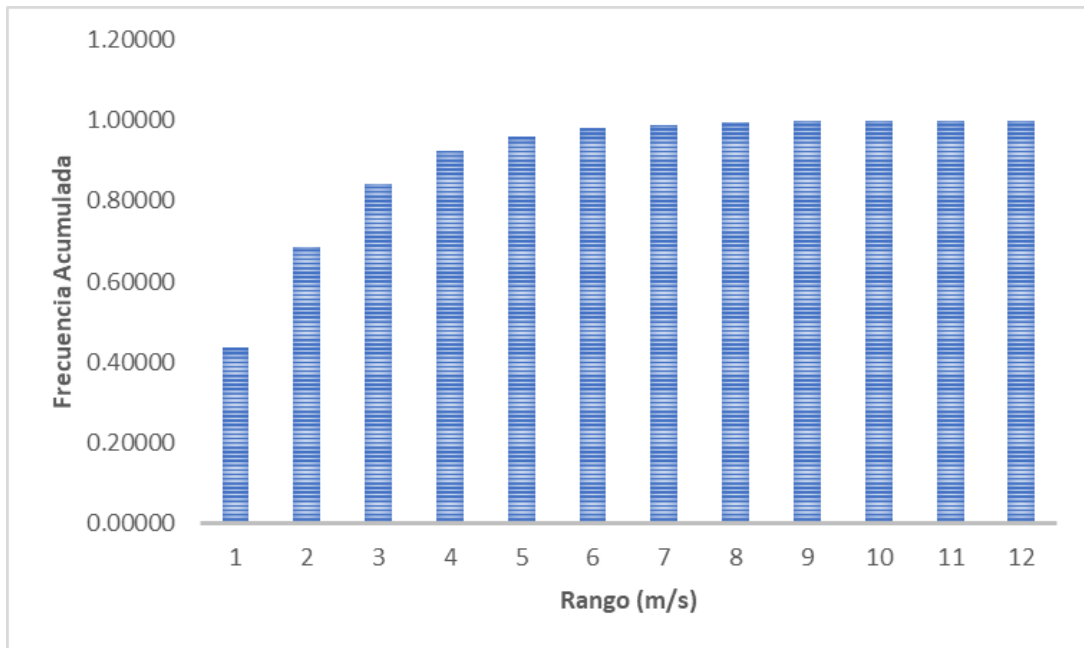


Figura 29. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de abril del 2020

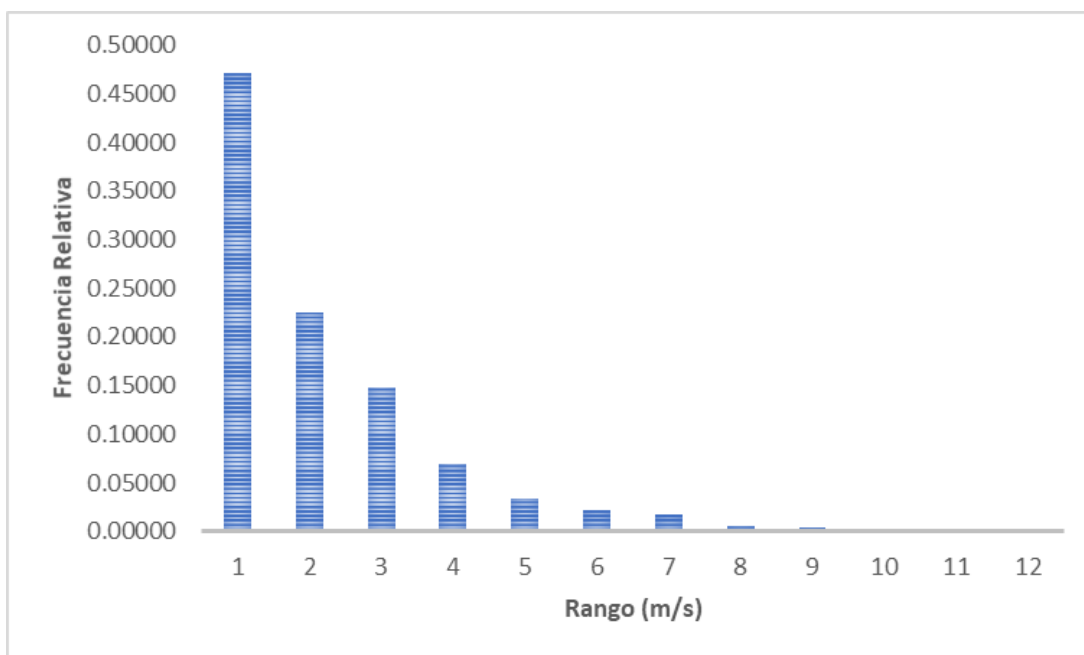


Figura 30. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de mayo del 2020

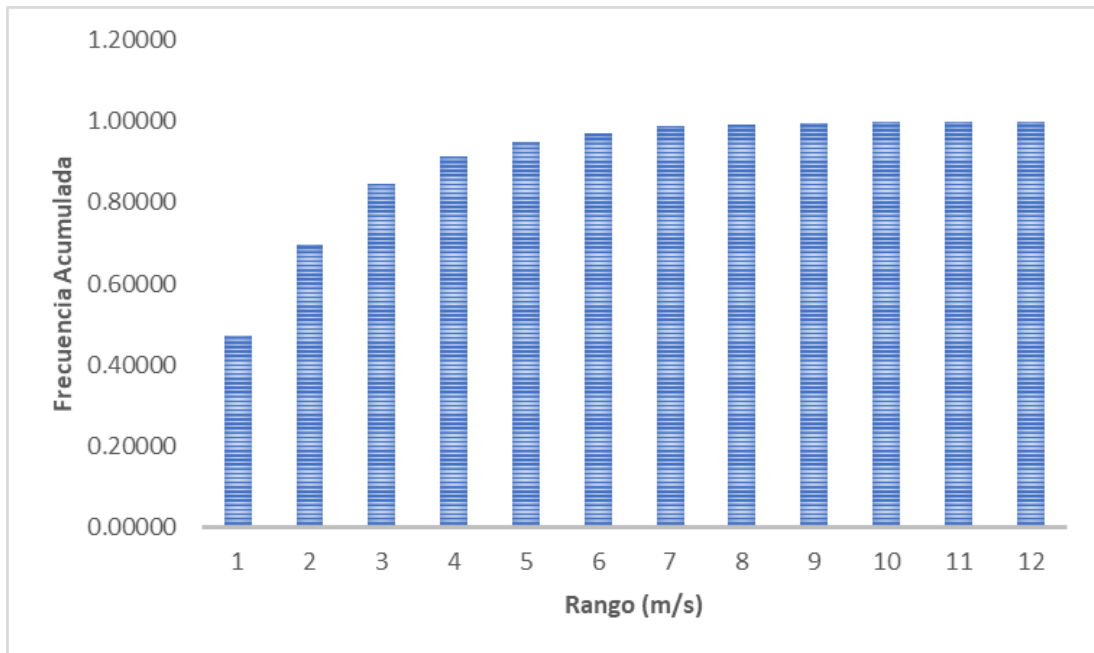


Figura 31. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de mayo del 2020

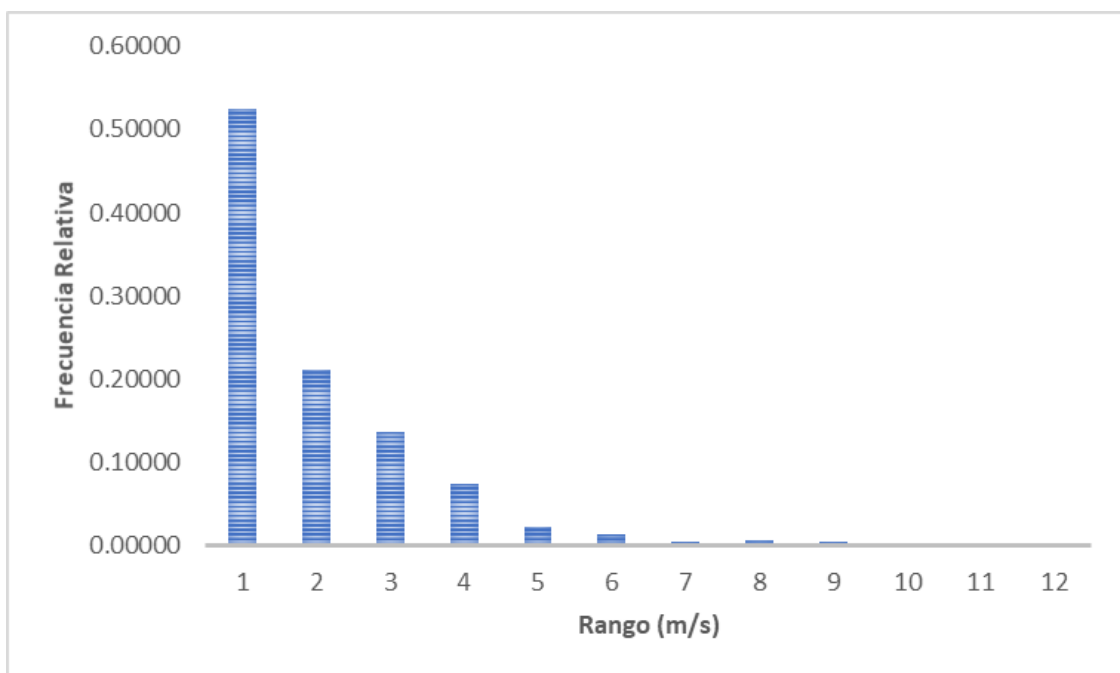


Figura 32. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de junio del 2020

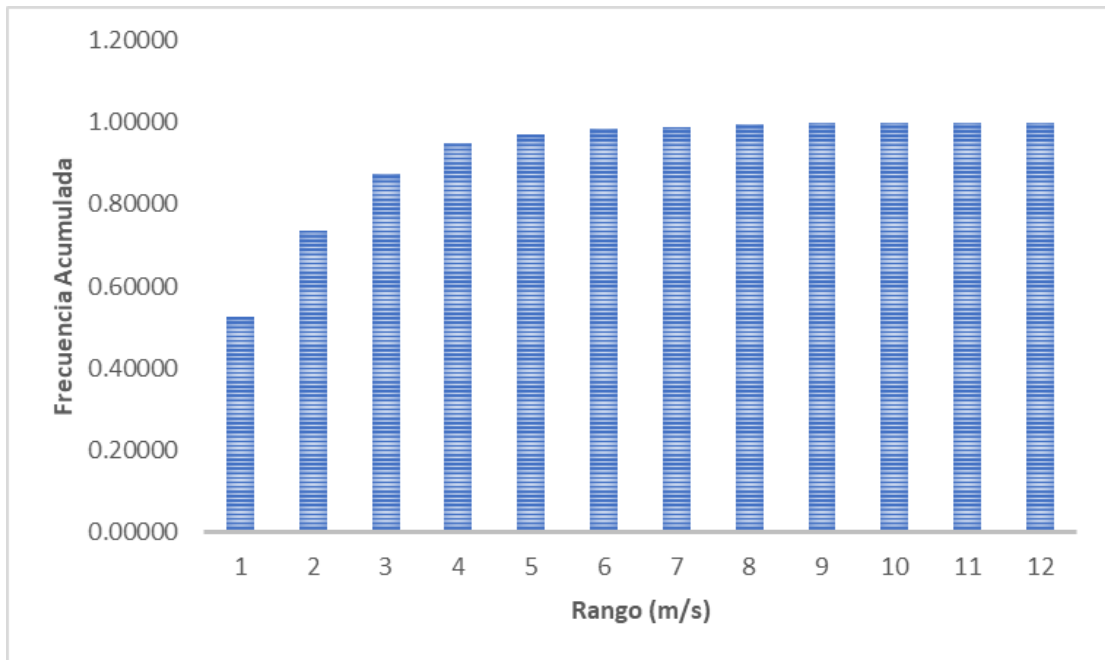


Figura 33. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de junio del 2020

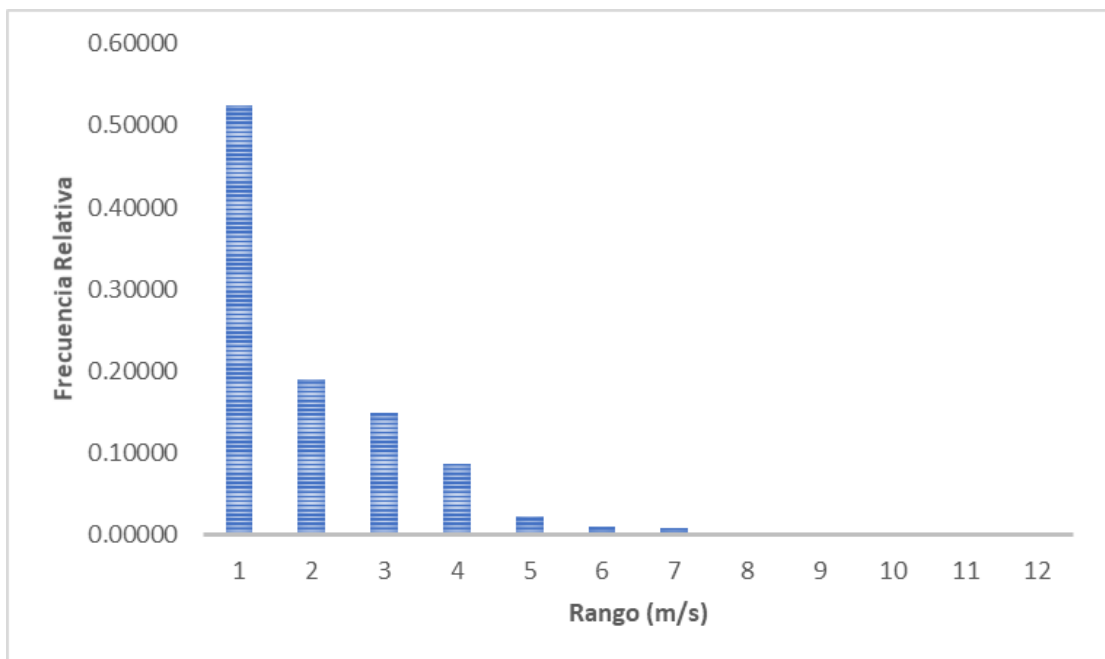


Figura 34. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de julio del 2020

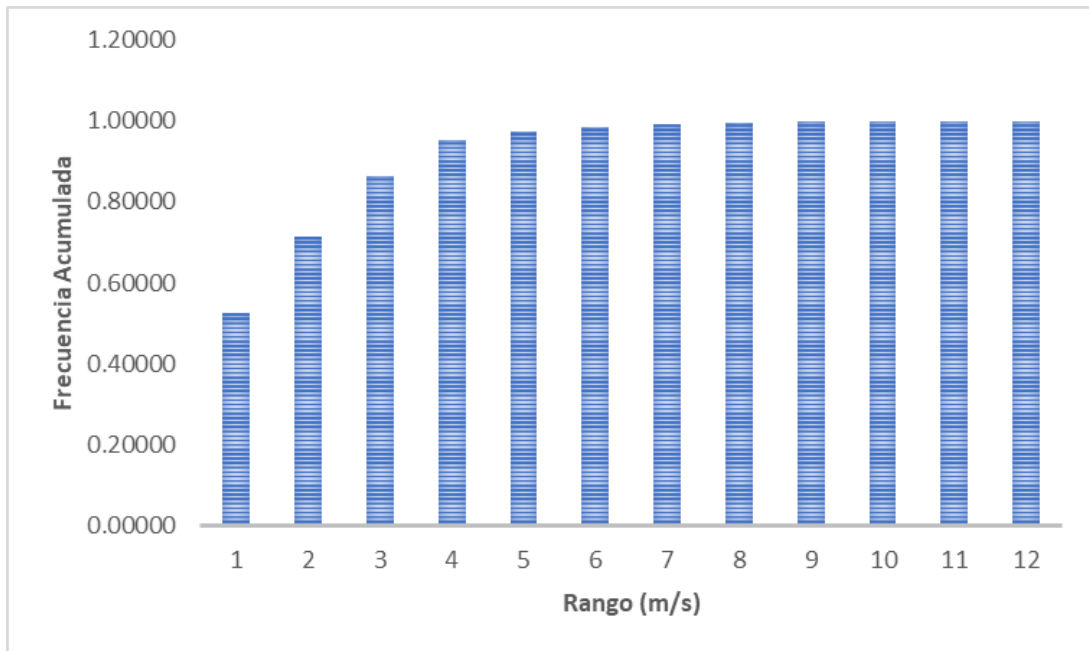


Figura 35. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de julio del 2020

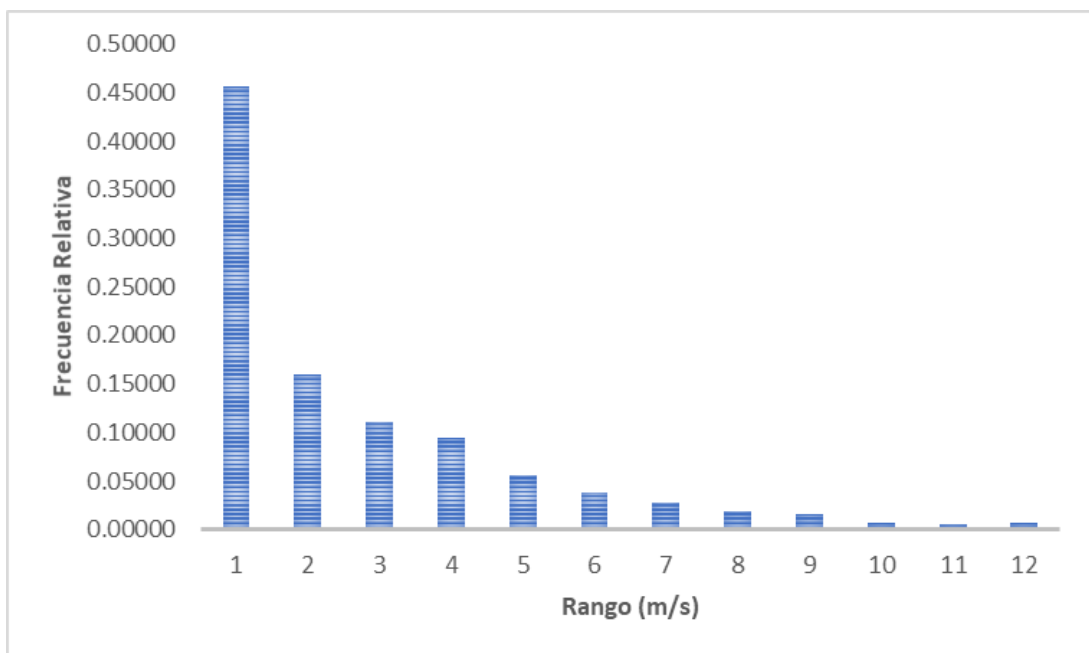


Figura 36. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de agosto del 2020

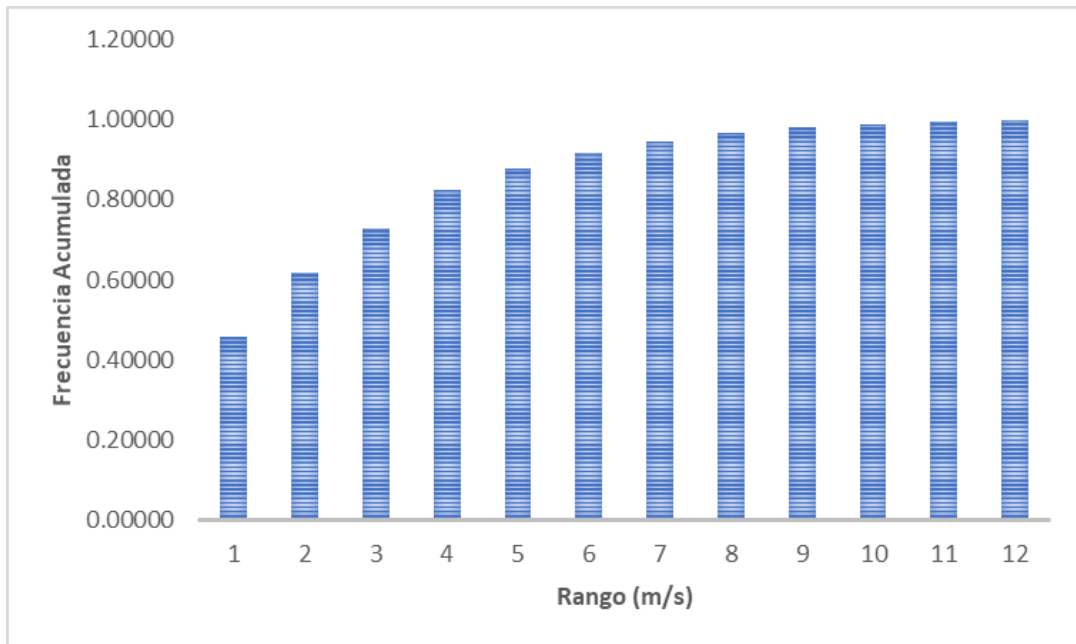


Figura 37. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de agosto del 2020

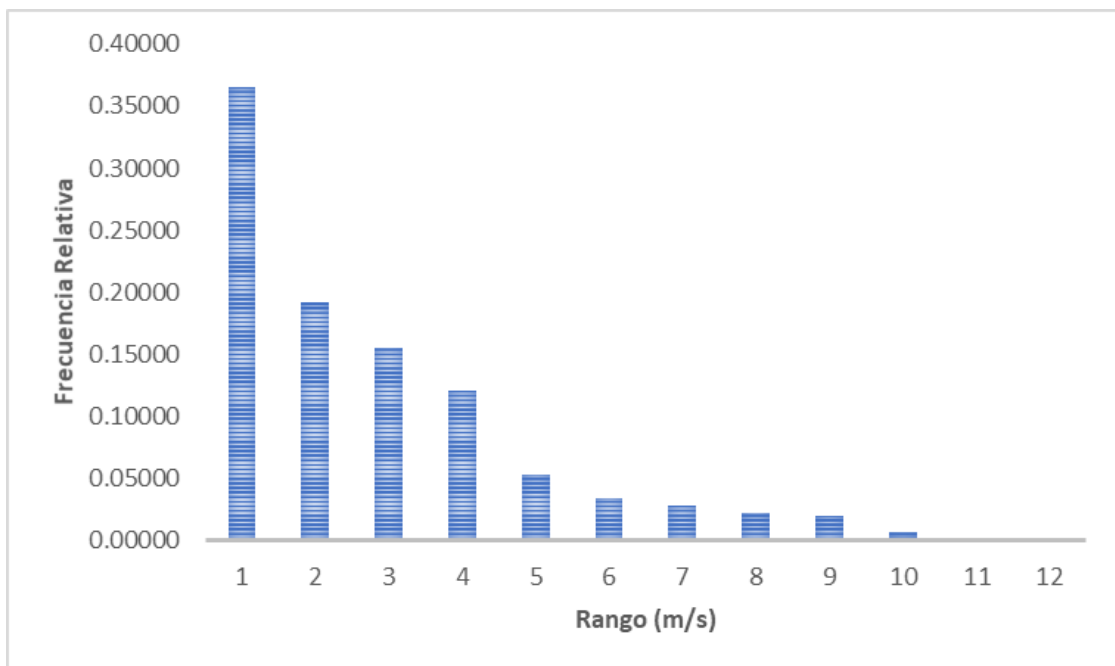


Figura 38. Frecuencia Relativa de la velocidad del viento, mes de setiembre del 2020

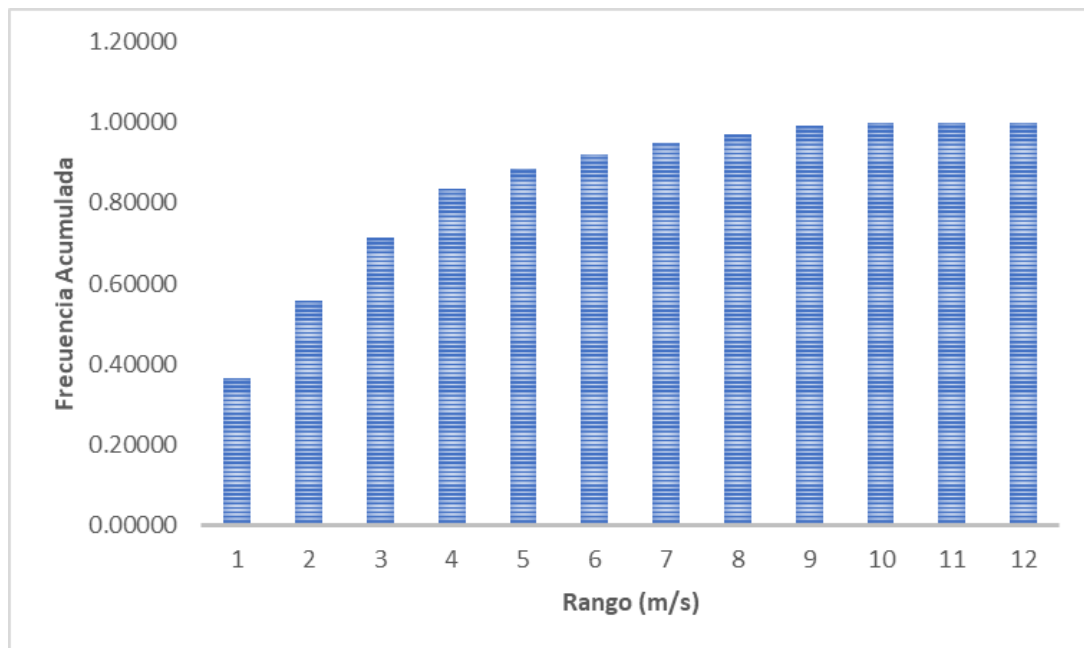


Figura 39. Frecuencia Acumulada de la velocidad del viento, mes de setiembre del 2020

3.4.5. Frecuencias Relativas anuales

Las frecuencias Relativas anuales de la velocidad del viento en la ciudad de Juliaca, tienen variaciones significativas para el mes de noviembre, siendo la más alta y para el mes de julio la más baja, posiblemente por la estación lluviosa con vientos fuertes y la estación fría o invierno con vientos muy bajos. En la Figura 40 se muestra la frecuencia relativa de la velocidad del viento anual de la ciudad de Juliaca.

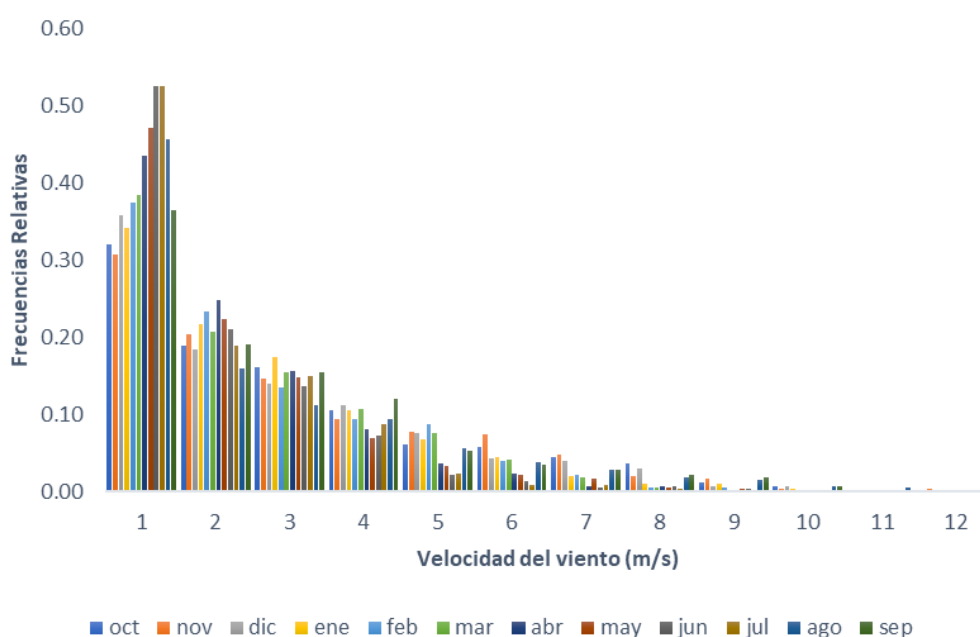


Figura 40. Frecuencias Relativas anuales de la velocidad del viento

3.4.6. Linealidad de Weibull

La linealidad de Weibull, determina el potencial de la energía eólica, además, de otras aplicaciones de la ingeniería como el mantenimiento, en la Figura 41 se muestra la aproximación lineal de los datos logarítmicos de la velocidad del viento, transformados a una ecuación lineal de primer grado, sin embargo, esta ecuación determina la $F(v)$ Función de distribución acumulativa de la velocidad del viento, utilizando el factor de forma y escala de la distribución de Weibull.

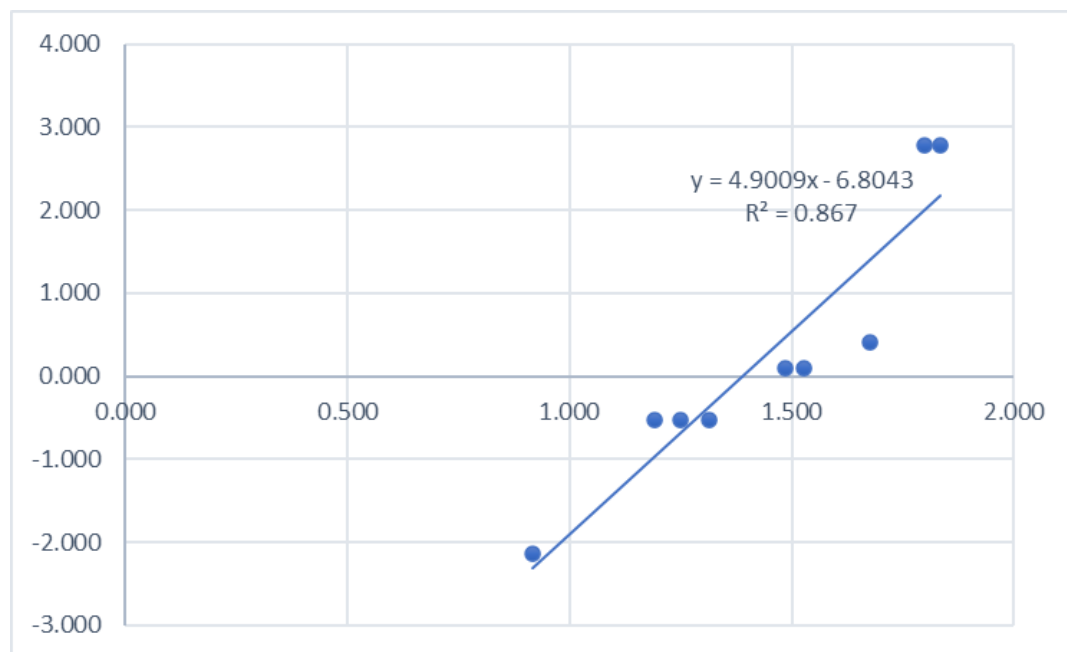


Figura 41. Linealidad del Weibull para determinar el factor de forma y escala

3.4.7. Rosa de viento

La rosa de viento o diagramas polares se determinaron utilizando el software WRPLOT, para dibujar el diagrama polar de la velocidad y la dirección del viento, en sentido de las agujas del reloj de 0° a 360° respectivamente (Islam *et al.*, 2011).

Se denomina Rosa de los vientos a la antigua forma de dividir el círculo para señalar los diferentes rumbos. Principalmente se divide en:

- Cuatro Puntos Cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste.
- Cuatro Puntos Laterales: Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste.
- Ocho Puntos Colaterales: NNE, ENE, NNO, ONO, SSE, ESE, SSO y OSO.

3.4.8. Simulación del sistema eólico conectado a red

Para realizar la simulación del sistema eólico conectado a red en el Altiplano de Juliaca, con los datos obtenidos de la estación meteorológica, se utilizó el software Matlab 2020, con el entorno gráfico de Simulink, (Figura 42).

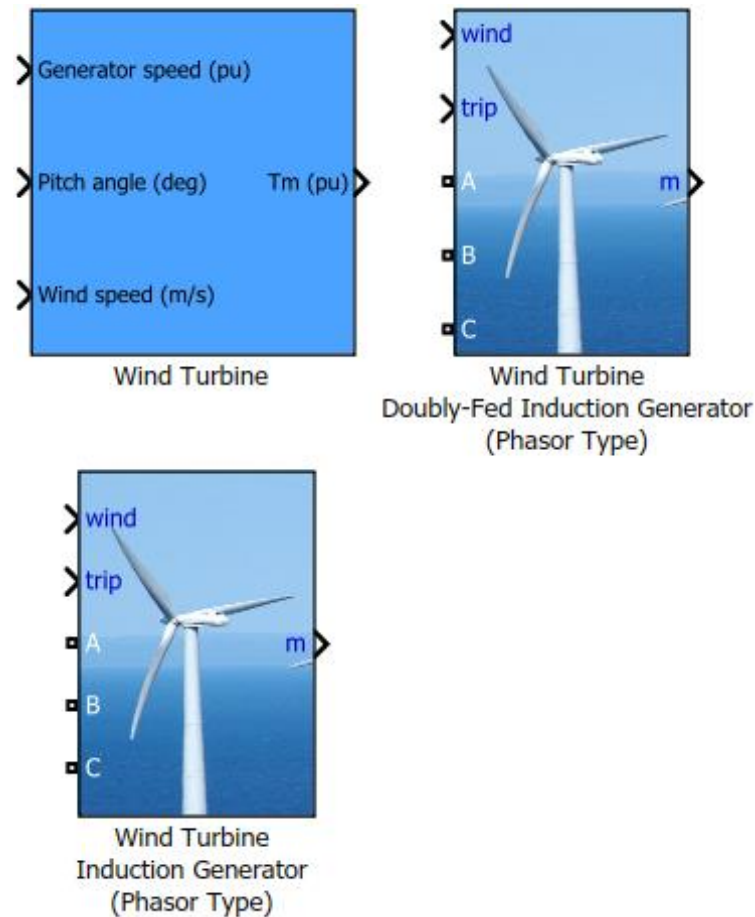


Figura 42. Diagrama de bloques de simulación de un sistema de generación eólico conectado a red

Fuente: (MatLab, 2020)

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos

Se detallan los siguientes métodos por objetivos:

3.5.1. Objetivo de la velocidad y dirección del viento promedio anual

Para determinar la velocidad y dirección del viento promedio anual, se utilizó el siguiente diseño de investigación:

- a) Durante un año o en las cuatro estaciones, se realizó la medición de la velocidad del viento y su dirección; usando un controlador industrial e instrumentos de medición de velocidad de viento y dirección.
- b) Para desarrollar el primer objetivo, se utilizó un medidor de viento tipo cazoleta de procedencia italiano y un medidor de dirección de viento con salida de señal estandarizada, además de un ANEMÓMETRO DIGITAL, se utilizará un PLC de procedencia alemana con módulos de expansión para la adquisición de datos en tiempo real, que será instalado en un tablero de control IP65 y los instrumentos instalados en la estructura. Los datos fueron registrados durante un año en las cuatro estaciones variables del altiplano.
- c) Se determinó la velocidad del viento y distribución de direcciones mediante una regresión lineal, para determinar el comportamiento del viento durante un año.

3.5.2. Objetivo del modelo matemático de la energía eólica

Para estimar el modelo de la energía eólica aplicando la distribución de Weibull y la rosa de viento, se utilizó el siguiente diseño de investigación:

- a) Para desarrollar el segundo objetivo, se utilizaron los datos recolectados del primer objetivo durante un año para su procesamiento con la metodología de probabilidad de la distribución Weibull.
- b) Las variables que se analizaron para su procesamiento por la distribución Weibull fueron, en el eje (x) la velocidad del viento en (m/s) y en el eje (y) la probabilidad de la distribución de Weibull en (%).
- c) Se estimó el modelo de la energía eólica por la distribución Weibull de dos parámetros. Los análisis estadísticos se realizaron con el software EXCEL y WEIBULL SOFT. La base de datos se procesó en Excel para luego exportarlo al Software estadístico, además, se graficó la rosa de viento para cada mes y de manera anual.

3.5.3. Objetivo de la simulación de un sistema eólico

Para simular el comportamiento de un sistema eólico conectado a red para la producción de energía, se utilizó el siguiente diseño de investigación:



- a) Finalmente, para desarrollar la simulación de aerogeneradores se utilizaron los datos del primer objetivo y el modelo de la distribución Weibull, en distintos aerogeneradores para simular su comportamiento en la producción de energía.
- b) Las variables que se analizaron para comparar el rendimiento en aerogeneradores fueron, la velocidad del viento (m/s), potencia (W), energía (kWh) y eficiencia del sistema eólico (%).
- c) Se determinó la simulación del rendimiento de aerogeneradores interconectados a red con los datos del primer objetivo y el modelo de distribución Weibull, analizando la afinidad de variables del tiempo, la velocidad del viento y la eficiencia del sistema eólico, por medio del Software MATLAB y un análisis estadístico de correlacional de variables.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características de la velocidad del viento

El comportamiento de la velocidad del viento en región altoandina es muy variable, debido a la presencia de lluvias entre los meses de octubre a marzo aproximadamente, la variabilidad estacional y los días soleados con presencia de viento y sin presencia de viento. La Figura 43, muestra la velocidad media del viento mensual durante 24 horas, con un valor mínimo de 1.28 m/s (junio) y máximo de 2.25 m/s (noviembre), sin embargo, la velocidad media del viento mensual entre las 11:00 h hasta las 19:00 h (tarde), presenta un valor mínimo de 2.41 m/s (junio) y máximo es de 4.41 m/s (octubre), registrados en la estación meteorológica ubicada a 10 m de altitud, siendo este último mayor en comparación al promedio de 24 horas, lo que significa que se tiene mayor cantidad de flujo de viento por las tardes en los meses entre agosto a enero, mostrados de similar forma por estos autores (Kaoga *et al.*, 2014; Soulouknga *et al.*, 2018). En un estudio realizado en el norte de Pakistán observo que la velocidad media del viento se encuentra por encima de 3.5 m/s, con alturas entre 60 y 80 m (Khalid Saeed *et al.*, 2019).

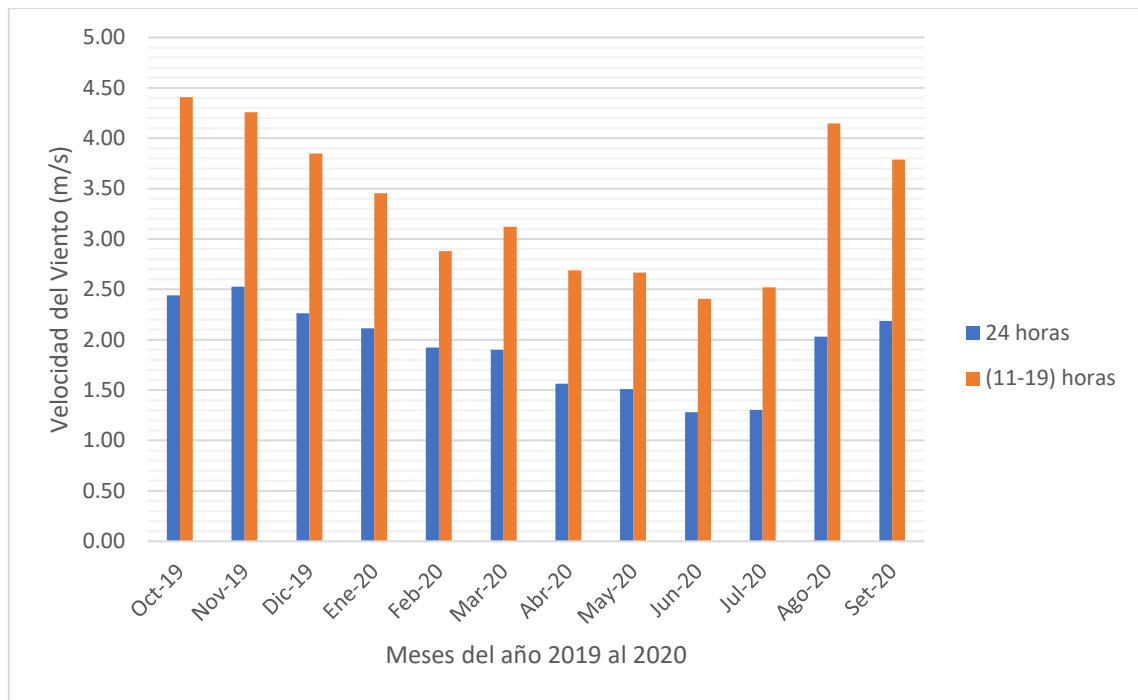


Figura 43. Velocidad media del viento anual, 24 horas y tarde en Juliaca

4.2. Análisis de parámetros Weibull de la velocidad del viento

Los valores de los parámetros de Weibull, están mostrados en la Tabla 1, donde el parámetro de forma k (adimensional) se encuentra entre 1.78 y 2.50 en los meses del año 2019 al 2020, el parámetro de escala c se encuentra entre 1.04 m/s a 3.42 m/s respectivamente, evaluados cada 24 horas. Mientras tanto el factor de forma y el factor de escala evaluados por la tarde se encuentra entre 3.47 a 5.95 y 3.02 m/s a 6.01 m/s respectivamente, observándose que el factor de forma y escala es mayor por la tarde. El factor de forma y escala media anual de Weibull evaluado las 24 horas es 2.16 y 2.20 m/s, en cambio el factor de forma y escala media anual de Weibull evaluado por las tardes es 5.38 y 5.29 m/s.

Tabla 1

Valores de parámetros de forma y escala para el ajuste Weibull, 24 horas y tarde

Mes	Año	Factor Forma (k) 24 horas	Factor de Escala (c) 24 horas	Factor de forma (k) 11:00 h a 19:00 h	Factor de escala (c) 11:00 a 19:00 h
Octubre	2019	2.33	3.17	4.90	6.01
Noviembre	2019	2.50	3.42	5.95	5.65
Diciembre	2019	2.20	2.84	4.11	5.14
Enero	2020	2.48	2.74	4.24	4.58
Febrero	2020	2.36	2.25	5.09	3.69
Marzo	2020	2.21	2.25	4.97	4.27
Abril	2020	2.24	1.72	5.62	3.49
Mayo	2020	1.97	1.44	4.46	3.44
Junio	2020	1.90	1.14	3.47	3.02
Julio	2020	1.78	1.04	5.74	3.22
Agosto	2020	1.84	1.84	6.14	5.70
Septiembre	2020	2.09	2.57	5.38	5.29
Media anual		2.16	2.20	5.01	4.46

La función densidad de la distribución Weibull de la velocidad del viento en Juliaca presenta comportamiento irregular durante el año, los parámetros Weibull varían entre la estación lluviosa (octubre - marzo) y la estación soleada (mayo - agosto) en los meses evaluados. En la Figura 44, se observa que la mayor densidad de viento está en el mes de noviembre, en cambio la menor densidad está en el mes de julio, evaluados cada 24 horas, sin embargo, la Figura 45, muestra que la máxima densidad de viento por la tarde se encuentra en el mes de octubre y la mínima densidad de viento está en el mes de junio. Esto significa que hay mayor velocidad del viento por la tarde en comparación de las 24 horas en el altiplano peruano, por lo tanto, las características de la velocidad del viento probablemente son uniformes por las tardes en los meses evaluados (Tiam Kapen *et al.*, 2020).

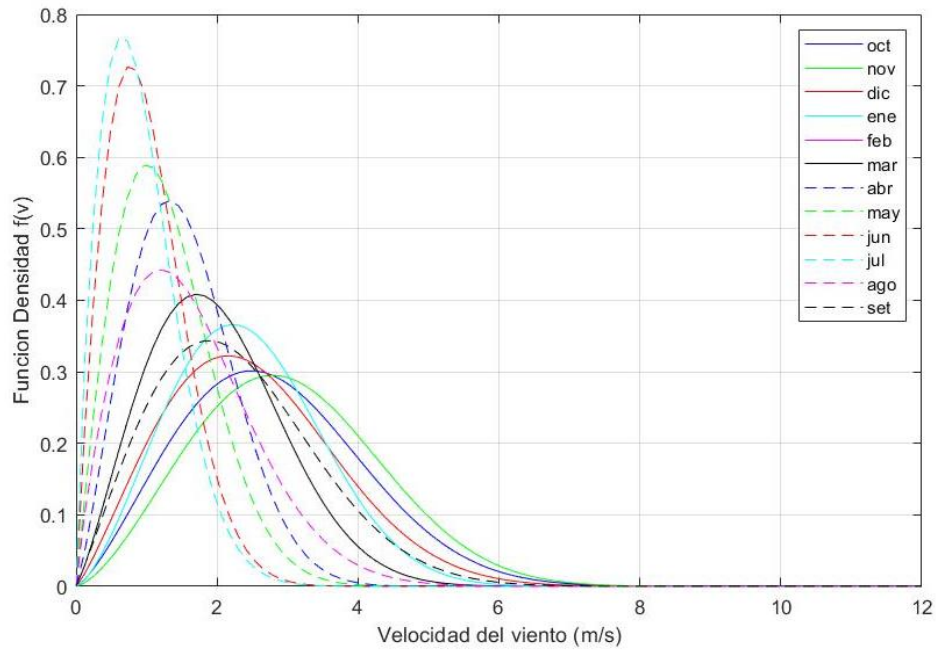


Figura 44. Función densidad mensual de la distribución de Weibull, cada 24 horas

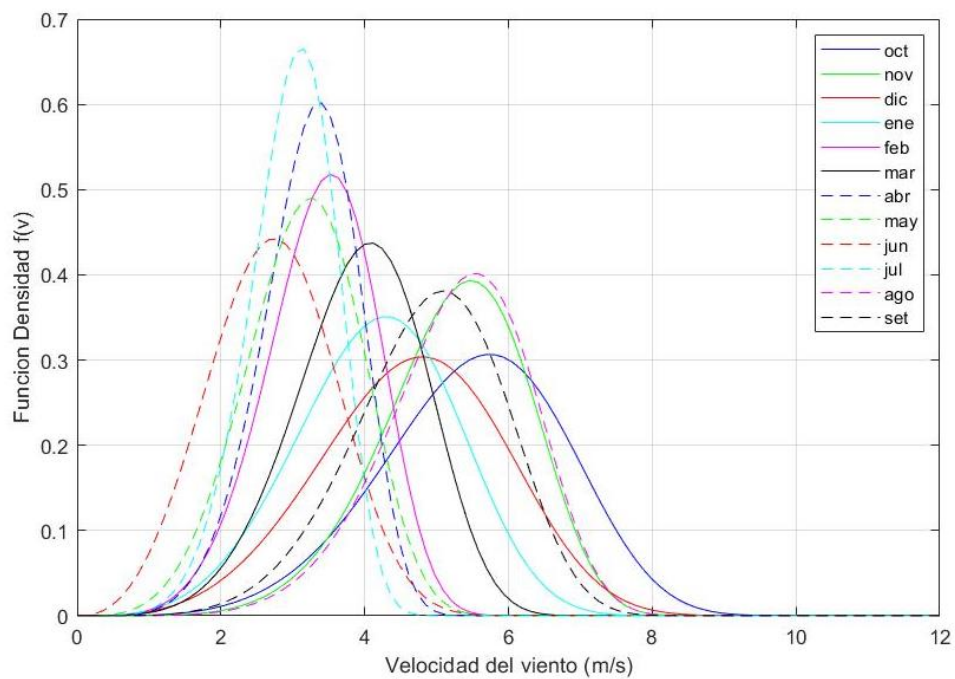


Figura 45. Función densidad mensual de la distribución de Weibull, por las tardes

4.3. Distribución acumulativa y distribución de Weibull

Los valores media anual de los parámetros Weibull de la velocidad del viento cada 24 horas, es para el factor de forma de 2.16 y el factor de escala de 2.20 m/s, reflejándose en la función de distribución acumulativa de Weibull, mostrado en la Figura 15, este resultado es similar a la función de densidad de la distribución Weibull mostrado en la Fig. 46, de similar forma otros estudios ajustaron la distribución acumulativa de Weibull se ajustan a la velocidad del viento (Islam *et al.*, 2011; Keyhani *et al.*, 2010).

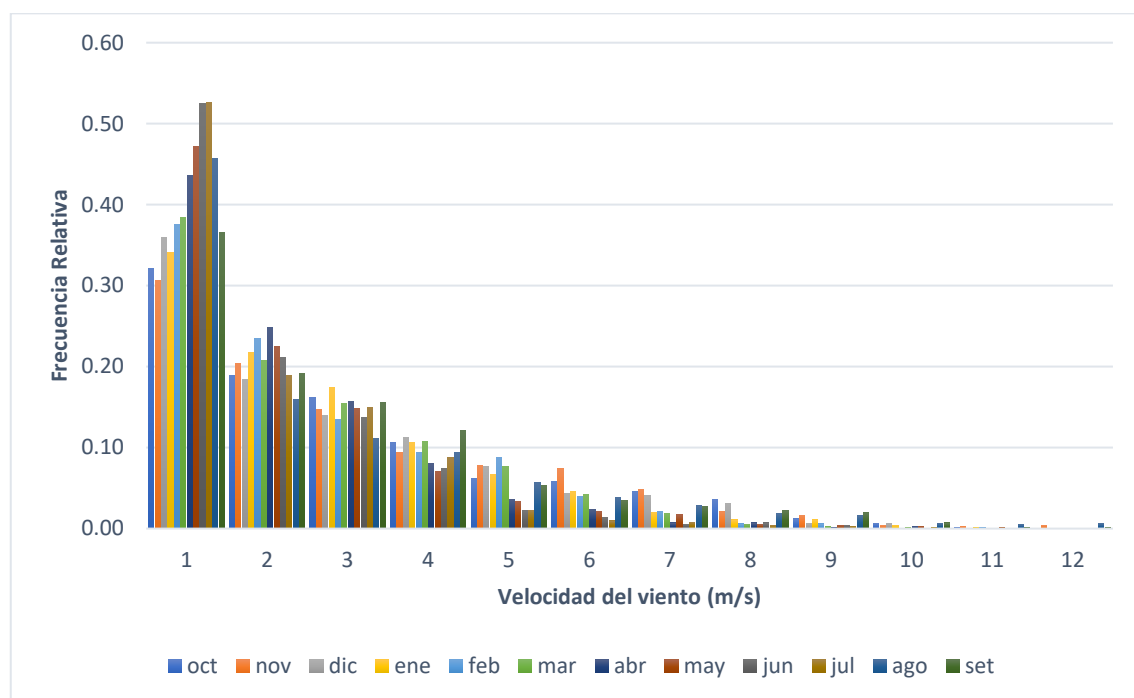


Figura 46. Función acumulativa de la distribución de Weibull

En la función de distribución de Weibull cada 24 horas, la probabilidad de la velocidad media del viento mínima en el mes de julio es de 0.49 m/s y 1.72 m/s, mientras tanto la velocidad media del viento máxima en el mes de noviembre es de 1.89 m/s y 5.76 m/s, presentándose mayor flujo de viento durante el día en el mes de noviembre (Figura 47). Los resultados de la función de Weibull evaluado por las tardes, determinan que la velocidad media del viento mínima en el mes de junio es de 1.82 m/s y 3.13 m/s, mientras tanto la velocidad media del viento máxima en el mes de octubre es de 3.25 m/s y 7.09 m/s respectivamente, observándose la mayor velocidad del viento por las tardes (Figura 48). Mediante la función de distribución de Weibull, la velocidad media del viento anual cada 24 horas esta entre 1.11 m/s a 3.34 m/s, sin embargo, el flujo de viento anual por las tardes esta entre 2.92 m/s a 5.45 m/s respectivamente (Figura 49), finalmente la velocidad media del viento es mayor por las tardes que durante todo el día.

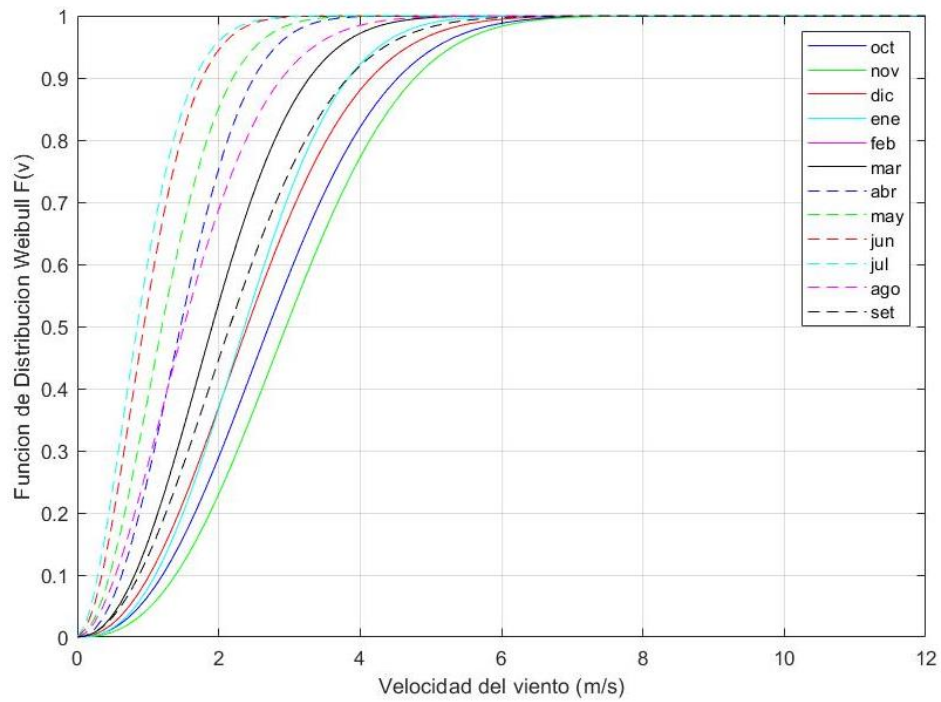


Figura 47. Función de distribución de Weibull mensual, cada 24 horas

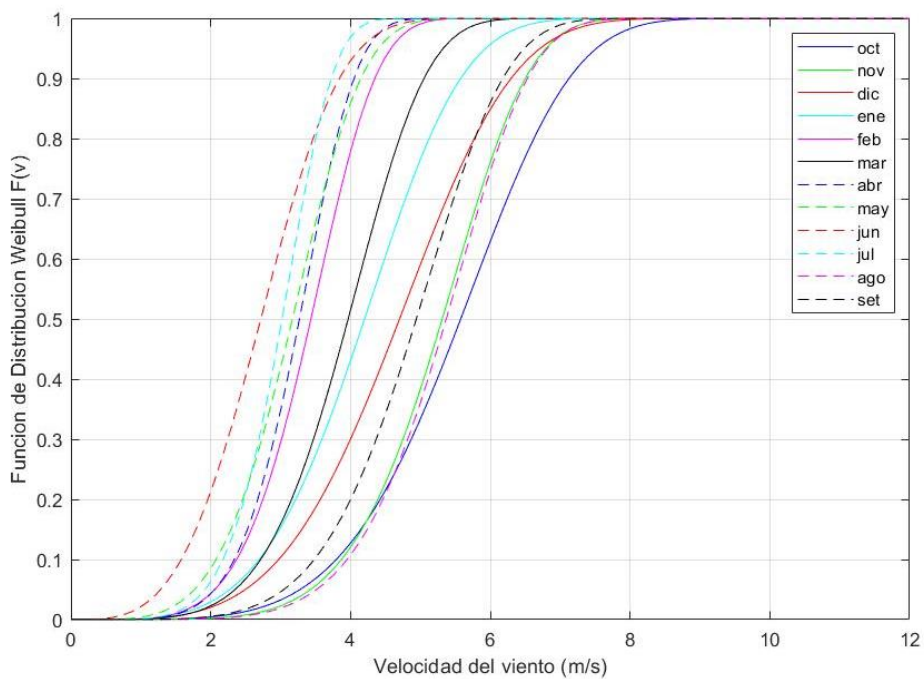


Figura 48. Función de distribución de Weibull mensual, por las tardes

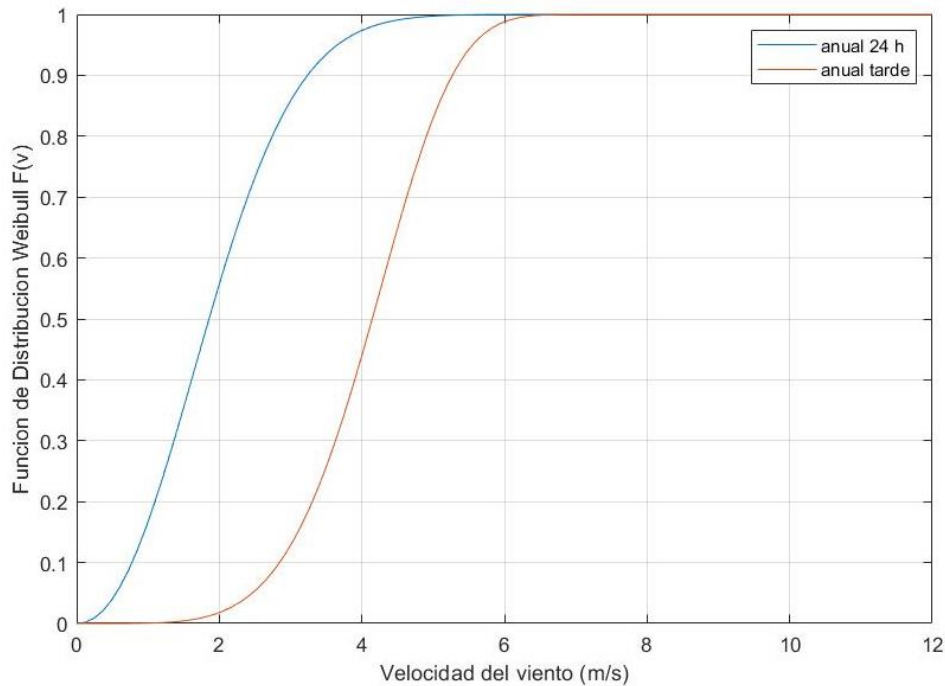


Figura 49. Función de distribución de Weibull anual, 24 horas y por las tardes

4.4. Análisis de dirección del viento (Rosa de viento)

La ciudad de Juliaca presenta un relieve plano en gran parte de su extensión, por esa razón la dirección del viento es posible que tenga pocas direcciones. La Figura 50 al 61, muestra los gráficos de las rosas de viento registrados en los diferentes meses del año 2019 y 2020. En los meses de junio a setiembre del 2020 se tiene menor presencia de viento, posiblemente debido a que estos meses están en invierno y con mayor cantidad de días soleados, mientras tanto en los meses de octubre a diciembre del 2019 y enero a mayo del 2020 se tiene mayor presencia de viento, la mayor parte del viento predominante está en la dirección Sureste, estando en la estación lluviosa. La rosa de viento media anual en Juliaca, mostrado en la Figura 62, se observa que la mayor parte del viento esta con dirección al Sureste, casi el 9 % del viento se encuentra entre 10° y 40° en sentido de las agujas del reloj, en algunos días con menor frecuencia se puede observar que está en dirección Oeste, siendo posible que los vientos cruzados sean relativamente bajos. La rosa de viento determina la dirección del viento en un diagrama polar entre 0° a 360° (Khalid Saeed *et al.*, 2019).

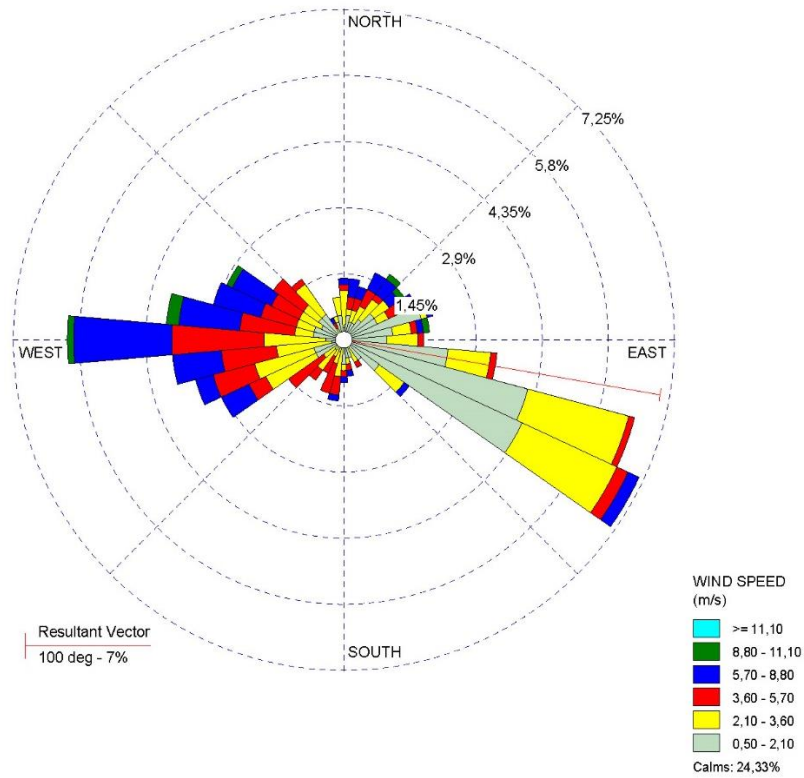


Figura 50. Rosa de viento del mes de octubre del 2019 en Juliaca

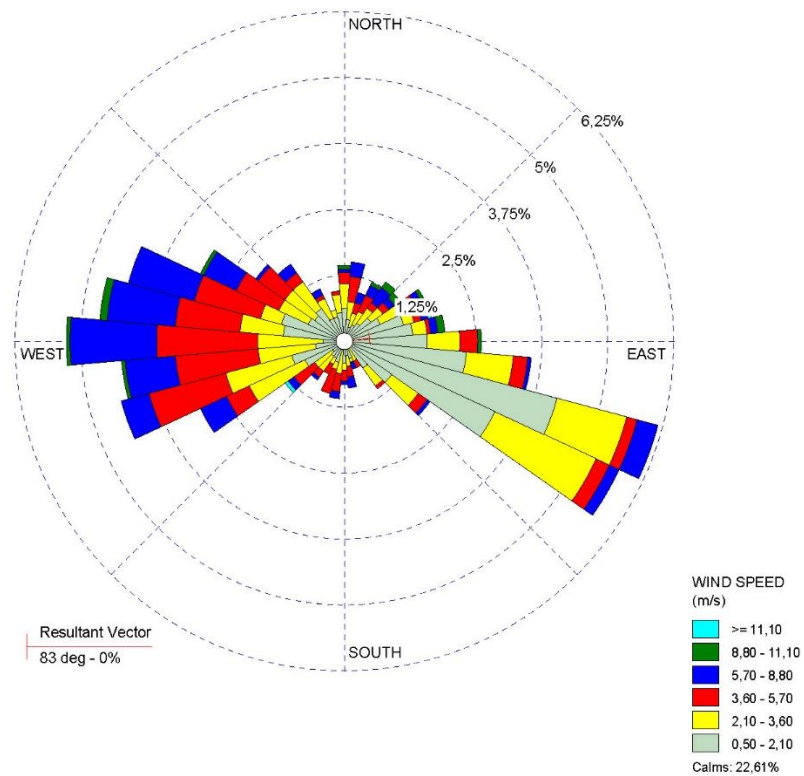


Figura 51. Rosa de viento del mes de noviembre del 2019 en Juliaca

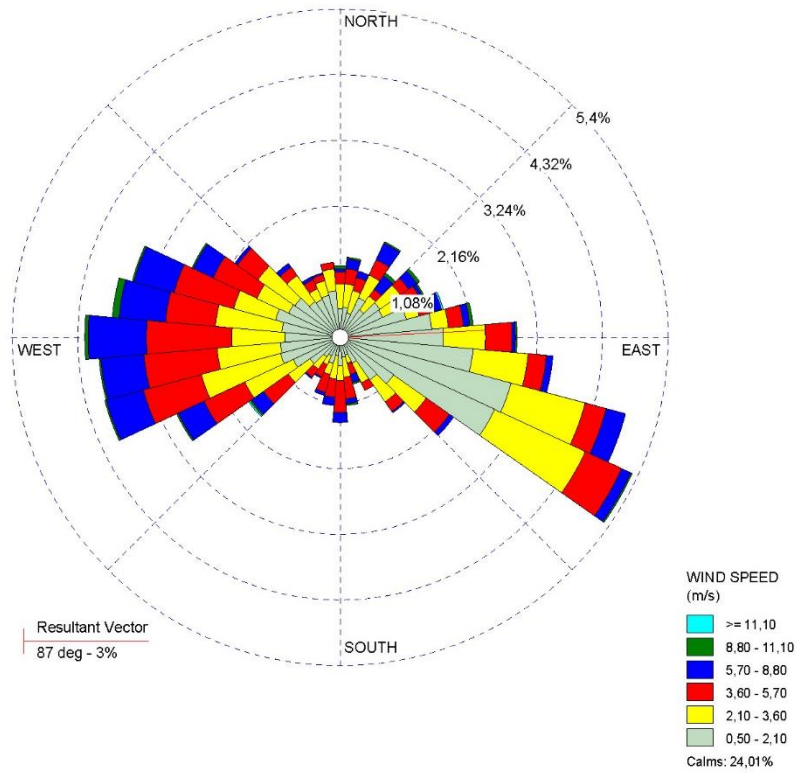


Figura 54. Rosa de viento del mes de febrero del 2019 en Juliaca

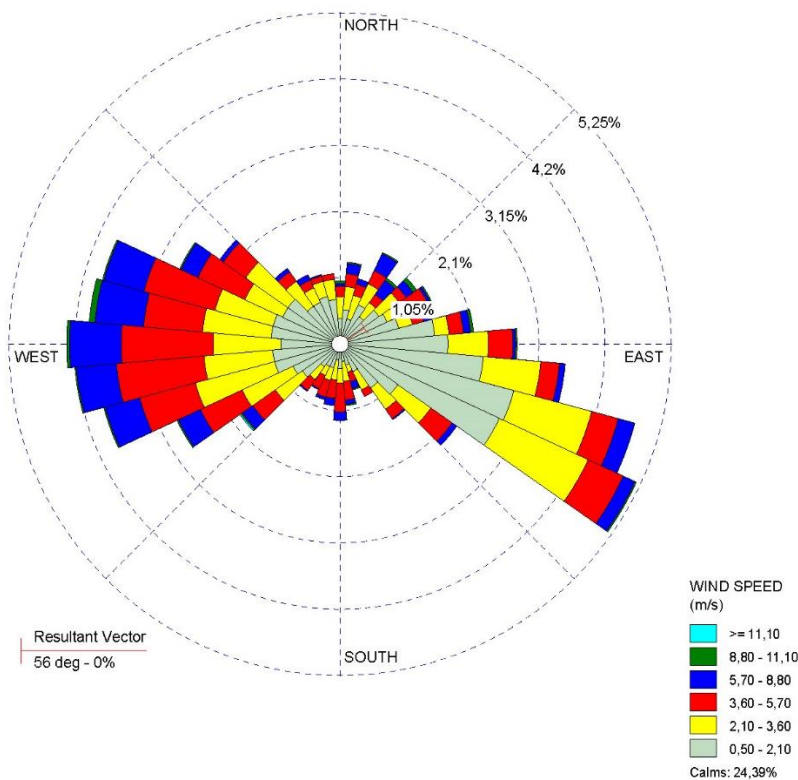


Figura 55. Rosa de viento del mes de marzo del 2020 en Juliaca

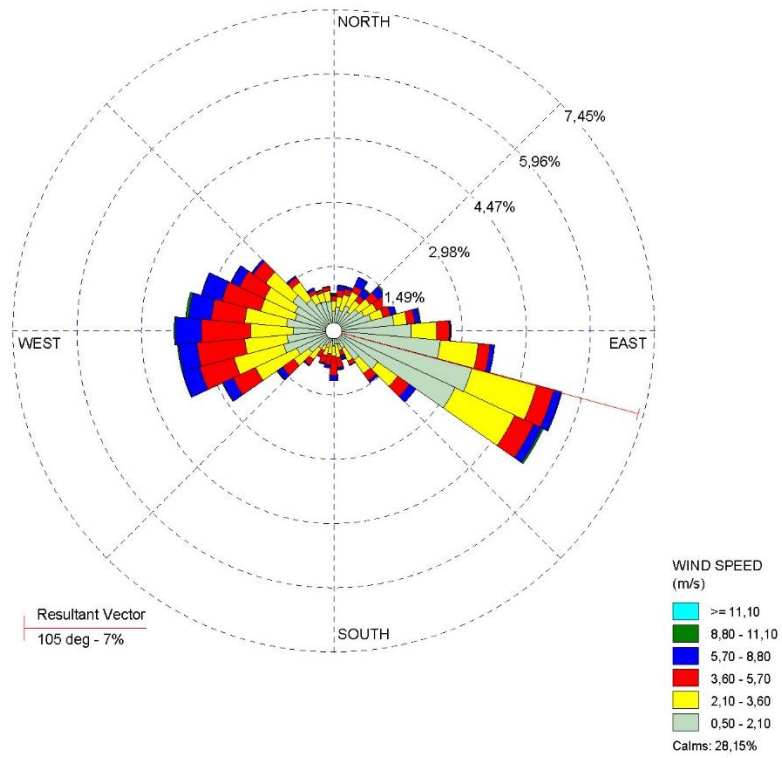


Figura 58. Rosa de viento del mes de junio del 2019 en Juliaca

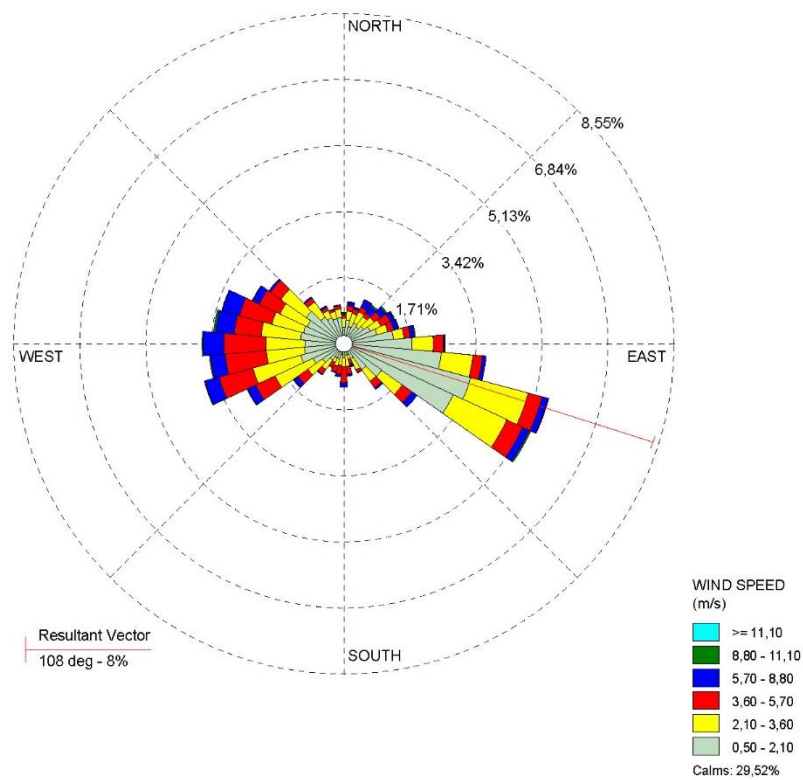


Figura 59. Rosa de viento del mes de julio del 2020 en Juliaca

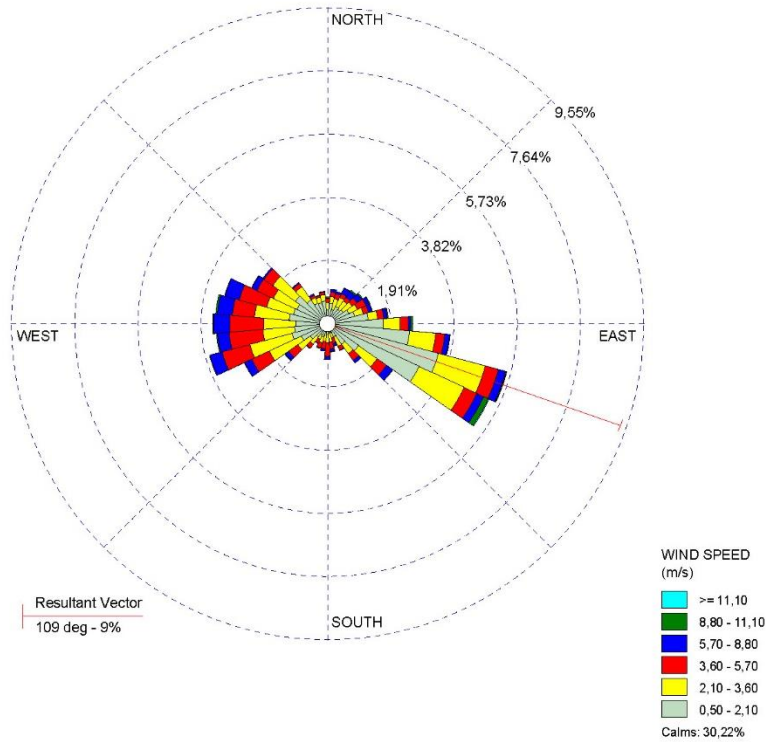


Figura 60. Rosa de viento del mes de agosto del 2019 en Juliaca

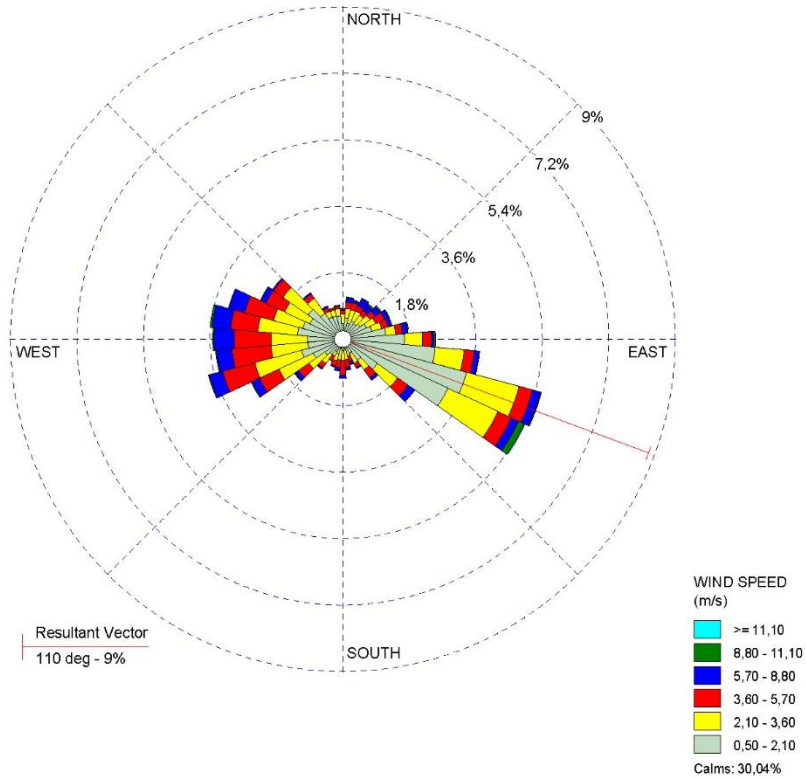


Figura 61. Rosa de viento del mes de setiembre del 2020 en Juliaca

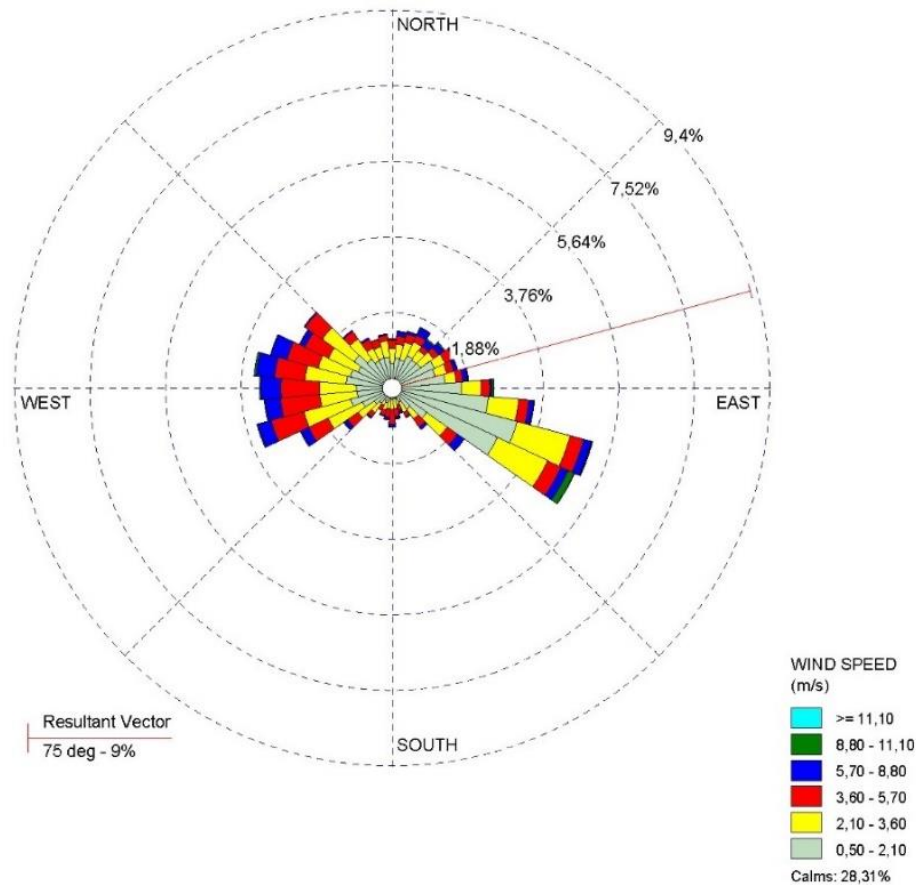


Figura 62. Rosa de viento media anual en Juliaca

4.5. Simulación del sistema eólico conectado a red, operación y mantenimiento

4.5.1. Simulación del sistema eólico interconectado a red

El aerogenerador utilizado para las pruebas de operación, tiene una potencia nominal de 400 W, generador asíncrono, tensión de salida trifásica en AC a frecuencia variable, tensión con el sistema de regulación a 24 VDC, 3 palas de fibra de carbono ultra ligero, velocidad de arranque 2.5 m/s y velocidad nominal de 12 m/s. Este sistema eólico presenta las siguientes características de operación, graficado en SIMULINK, (Figura 63).

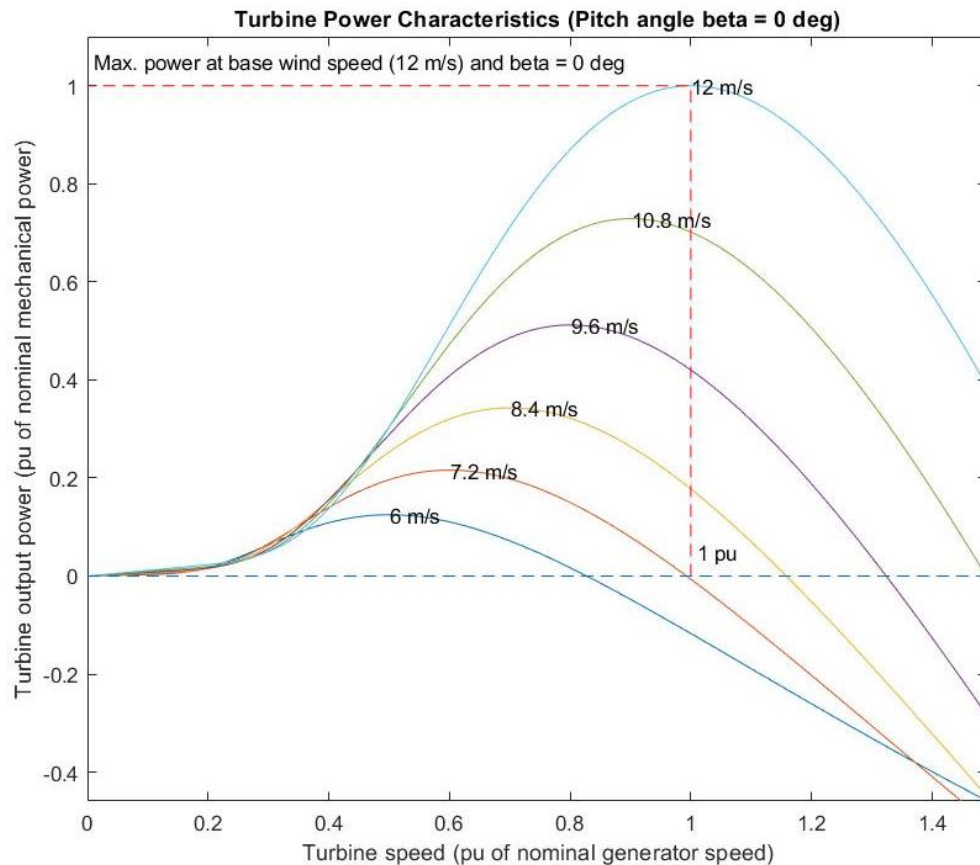


Figura 63. Características mecánicas del aerogenerador SHZOND de 400 W

La simulación del generador eólico SHZOND, conectado a red pública trifásica a una tensión de 380 V y una frecuencia de 60 Hz, realizado mediante el programa SIMULINK, realizado con los resultados obtenidos de la función de distribución de Weibull de la ciudad de Juliaca, tomando como base la velocidad mínima del viento de 3 m/s y velocidad máxima del viento de 9.64 m/s, se acopla a la red pública con una perturbación armónica total (THD) menor al 5%. En la Figura 64, en el apartado (a), se observa la salida de tensión a la red pública, la primera onda presenta una ligera distorsión inicial de la onda senoidal y a partir de la tercera onda se estabiliza hasta llegar a un THD de 0.2828%, en el apartado (b) se observa la salida de la onda de la corriente, empezando inicialmente de 0 A hasta llegar a su corriente nominal, sin perturbar la onda senoidal, en el apartado (c) la salida de la onda cuadrada del inversor de red a 60 Hz y frecuencia de pulsación de 8 kHz, esto significa que la calidad de energía eléctrica es buena, porque el rango de la frecuencia de pulsación para la conexión a red está entre (4 – 16) kHz, finalmente la tensión de inversor en el lado DC oscila entre 750 a 800 V, para mantener una tensión de salida en AC en valor eficaz de 380 V y una amplitud de 537 V. Por lo tanto, los resultados de la simulación

muestran que la calidad de inyección de energía eléctrica por parte del generador eólico es buena, sin embargo, esto es debido a la calidad del inversor AC/DC DC/AC conectado a red, que incluya filtros para reestablecer la calidad de energía que se manifiesta en la deformación de la onda senoidal.

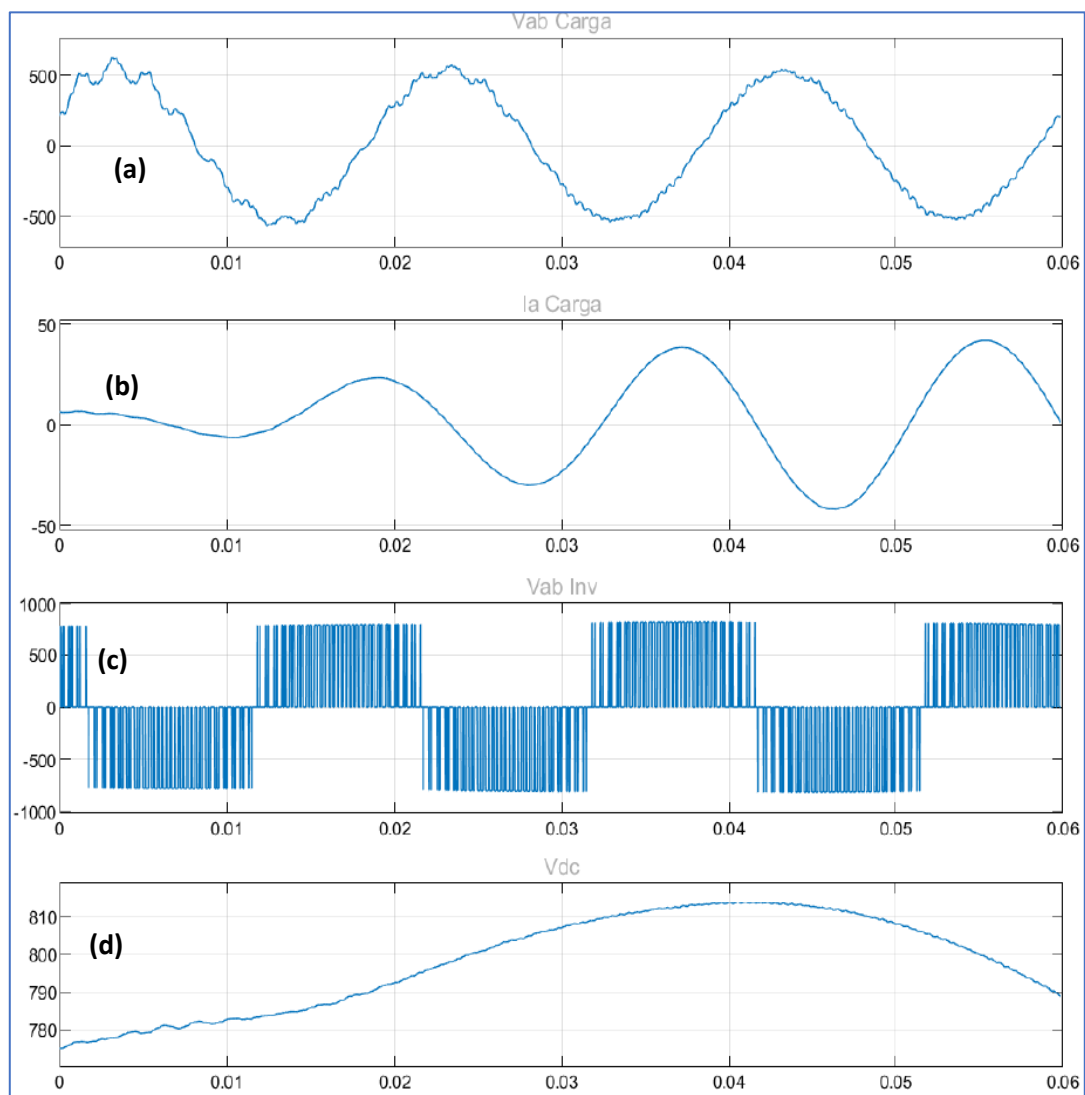


Figura 64. (a) Voltaje de inyección a la red, (b) Corriente de inyección a la red, (c) Voltaje de salida del inversor de red AC y (d) Voltaje en la entra del inversor DC

4.5.2. Operación y mantenimiento (O&M) de un sistema eólico en BT

La continuidad del flujo del viento en la ciudad de Juliaca por las tardes es elevada, que puede ser aprovechado por un sistema de aerogeneradores, sin embargo, las condiciones climáticas de la zona en la estación lluviosa, pueden dificultar su operación, teniendo como consecuencia un mantenimiento con mayor frecuencia por desgaste mecánico de las partes móviles, aumentando los costos de O&M y

reduciendo la continuidad en la generación de electricidad. Por consiguiente, mejorar las actividades de mantenimiento es la solución más adecuada para reducir los riesgos en la operación (Feng *et al.*, 2019). La pala de un aerogenerador es el componente principal que puede sufrir daños por la fatiga del viento (Zhao *et al.*, 2020) y la carga de la lluvia (Ke *et al.*, 2019).

La principal limitante en la operación de aerogeneradores en la región altoandina del altiplano peruano, son los días lluviosos, pudiendo reducir en el tiempo de vida útil del aerogenerador, en esta zona se tiene alta precipitación lo que puede ocasionar la erosión de las palas del aerogenerador, debido a altas velocidades. La lluvia tiene efectos en la erosión de las palas mecánicas, disminuyendo el rendimiento o la producción de energía hasta 1.5% aproximadamente (Papi *et al.*, 2021), sin embargo, la lluvia intensa mayor a 20 mm puede causar el desgaste de las palas en aerogeneradores (Hasager *et al.*, 2020). Además, los vientos cruzados en esta región ocurren con poca frecuencia, pudiendo tener efectos a mediano y largo plazo en el desgaste de los alabes y el mecanismo de dirección de un aerogenerador, mientras tanto el potencial de la energía eólica permite aplicar en los sistemas de generación eólica energía eléctrica, siendo un sistema móvil, tiene mantenimiento preventivo y en algunos casos correctivo.

Considerando la potencia estimada de un aerogenerador de 10 kW, con los resultados obtenidos, el perfil de la velocidad media del viento anual máxima de 7 m/s muestra un rendimiento de 48.45%, mientras tanto el rendimiento mínimo estimado es de 7.22% con velocidad base del viento de 3 m/s, (Tabla 2). Sin embargo, estos resultados representan la perspectiva de operación en condiciones climáticas de la zona a una altitud por encima 3800 msnm y con perfiles de velocidad del viento variables.

Tabla 2

Perfiles de velocidad media del viento vs potencia estimada de 10 Kw

Velocidad del viento (m/s)	Potencia estimada (kW)	Rendimiento (%)
2.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00
3.00	0.72	7.22
3.50	1.24	12.37
4.00	1.75	17.53
4.50	2.27	22.68
5.00	2.78	27.83
5.50	3.30	32.99
6.00	3.81	38.14
6.50	4.33	43.30
7.00	4.85	48.45

CONCLUSIONES

La velocidad media del viento durante las 24 horas varía entre 1.11 m/s a 3.34 m/s, en cambio la velocidad del viento determinado por las tardes esta entre 2.92 m/s a 5.45 m/s. Por lo tanto, se tiene mayor velocidad del viento por las tardes, que puede ser aprovechado por aerogeneradores de baja potencia instalados en el sector residencial, en cambio debido a que la velocidad del viento a lo largo del año no es constante, hay meses que están en la estación de invierno donde el flujo de viento es muy bajo. Finalmente, la dirección de la velocidad media del viento anual tiene mayor significancia al Sureste y en algunos días hacia el Oeste, esto indicaría que los vientos cruzados posiblemente sean relativamente bajos.

El potencial de la energía eólica en el altiplano peruano de Juliaca, evaluado por el método de la función de distribución de Weibull de la velocidad del viento, determinando el factor de forma y escala media anual es 2.16 y 2.20 m/s cada 24 horas, sin embargo, el factor de forma y escala media anual por las tardes es 5.01 y 4.46 m/s respectivamente, por lo tanto, con estos valores se estima el modelo para el comportamiento del viento en Juliaca.

El sistema eólico conectado a red pública, mediante la simulación la salida de la tensión del sistema interconectado tiene un THD de 0.2828%, este significa que la distorsión a la red eléctrica es mínima, debido a que la deformación de la onda senoidal es muy baja, la calidad de energía de la salida del inversor en AC es de 60 Hz, y una frecuencia de pulsación de 8 kHz, esto significa que se tiene una calidad de energía buena para la inyección a la red pública. Además, la potencia de generación del aerogenerador simulado esta entre (0.72 a 4.85) kW, representando un 48.45% de energía eléctrica generada, considerando mayor potencia de generación por las tardes.



RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando con sistemas eólicos autónomos y conectados a red, con datos evaluados en campo, posiblemente se podría realizar un análisis comparativo de los sistemas eólicos con sistemas fotovoltaicos.

Con los datos obtenidos, en futuros proyectos de investigación se podría implementar un sistema de aerogeneradores de baja potencia autónomos y conectados a red.

Investigar sobre el comportamiento de aerogeneradores en altitudes elevadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adaramola, M., & Krogstad, P.-Å. (2011). Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance. *Renewable Energy*, 36(8), 2078-2086.
- Ahmed, A. S. (2018, 2018/02/01/). Wind energy characteristics and wind park installation in Shark El-Ouinat, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 734-742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.031>
- Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766.
- Aririguzo, J. C., & Ekwe, E. B. (2019, 2019/02/01/). Weibull distribution analysis of wind energy prospect for Umudike, Nigeria for power generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 160-163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.01.001>
- Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Zhang, H., & Yuan, J. (2021, 2021/03/15/). Analyzing the effect of natural gas, nuclear energy and renewable energy on GDP and carbon emissions: A multi-variate panel data analysis. *Energy*, 219, 119592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119592>
- Baban, S. M., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable Energy*, 24(1), 59-71.
- Bahrami, A., Teimourian, A., Okoye, C. O., & Shiri, H. (2019, 2019/06/20/). Technical and economic analysis of wind energy potential in Uzbekistan. *Journal of Cleaner Production*, 223, 801-814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.140>
- Bechtle, P., Schelbergen, M., Schmehl, R., Zillmann, U., & Watson, S. (2019, 2019/10/01/). Airborne wind energy resource analysis. *Renewable Energy*, 141, 1103-1116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.118>
- Bórawski, P., Bełdycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., & Dunn, J. W. (2020, 2020/12/01/). Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*, 161, 691-700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.081>

- Chang, T.-J., Wu, Y.-T., Hsu, H.-Y., Chu, C.-R., & Liao, C.-M. (2003). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28(6), 851-871.
- Dai, B., Zhao, P., Liu, S., Su, M., Zhong, D., Qian, J., Hu, X., & Hao, Y. (2020, 2020/10/15/). Assessment of heat pump with carbon dioxide/low-global warming potential working fluid mixture for drying process: Energy and emissions saving potential. *Energy Conversion and Management*, 222, 113225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113225>
- Deep, S., Sarkar, A., Ghawat, M., & Rajak, M. K. (2020, 2020/12/01/). Estimation of the wind energy potential for coastal locations in India using the Weibull model. *Renewable Energy*, 161, 319-339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.054>
- Dorrell, J., & Lee, K. (2020, 2020/11/01/). The Politics of Wind: A state level analysis of political party impact on wind energy development in the United States. *Energy Research & Social Science*, 69, 101602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101602>
- Drücke, J., Borsche, M., James, P., Kaspar, F., Pfeifroth, U., Ahrens, B., & Trentmann, J. (2021, 2021/02/01/). Climatological analysis of solar and wind energy in Germany using the Grosswetterlagen classification. *Renewable Energy*, 164, 1254-1266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.102>
- Enevoldsen, P., & Xydis, G. (2019, 2019/06/01/). Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components. *Energy for Sustainable Development*, 50, 18-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.003>
- Feng, Q., Zhao, X., Fan, D., Cai, B., Liu, Y., & Ren, Y. (2019). Resilience design method based on meta-structure: A case study of offshore wind farm. *Reliability Engineering & System Safety*, 186, 232-244.
- Gao, Y., Ma, S., Wang, T., Wang, T., Gong, Y., Peng, F., & Tsunekawa, A. (2020, 2020/12/15/). Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency. *Energy Conversion and Management*, 226, 113580. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113580>

- Garbolino, E., Daniel, W., & Mendoza, G. H. (2021). Chapter 8 - Geoprospective assessment of the wood energy supply chain sustainability in a context of global warming and land use change within 2050 in Mediterranean area. In E. Garbolino & C. Voiron-Canicio (Eds.), *Ecosystem and Territorial Resilience* (pp. 219-245). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818215-4.00008-0>
- Guarienti, J. A., Kaufmann Almeida, A., Menegati Neto, A., de Oliveira Ferreira, A. R., Ottonelli, J. P., & Kaufmann de Almeida, I. (2020, 2020/12/01/). Performance analysis of numerical methods for determining Weibull distribution parameters applied to wind speed in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100854. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100854>
- Hasager, C., Vejen, F., Bech, J. I., Skrzypiński, W. R., Tilg, A. M., & Nielsen, M. (2020, 2020/04/01/). Assessment of the rain and wind climate with focus on wind turbine blade leading edge erosion rate and expected lifetime in Danish Seas. *Renewable Energy*, 149, 91-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.043>
- Höltinger, S., Salak, B., Schauppenlehner, T., Scherhauser, P., & Schmidt, J. (2016, 2016/11/01/). Austria's wind energy potential – A participatory modeling approach to assess socio-political and market acceptance. *Energy Policy*, 98, 49-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.08.010>
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2021, 2021/01/01/). Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110192>
- Islam, M. M., Zhong, X., Sun, Z., Xiong, H., & Hu, W. (2019, 2019/08/01/). Real-time frequency regulation using aggregated electric vehicles in smart grid. *Computers & Industrial Engineering*, 134, 11-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.025>
- Islam, M. R., Saidur, R., & Rahim, N. A. (2011, 2011/02/01/). Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy*, 36(2), 985-992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.011>

- Ivanovski, K., Hailemariam, A., & Smyth, R. (2020, 2020/11/07/). The effect of renewable and non-renewable energy consumption on economic growth: Non-parametric evidence. *Journal of Cleaner Production*, 124956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124956>
- Kan, C., Devrim, Y., & Eryilmaz, S. (2020, 2020/11/01/). On the theoretical distribution of the wind farm power when there is a correlation between wind speed and wind turbine availability. *Reliability Engineering & System Safety*, 203, 107115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107115>
- Kaoga, D. K., Sergeb, D. Y., Raidandic, D., & Djongyangd, N. (2014). Performance assessment of two-parameter Weibull distribution methods for wind energy applications in the district of Maroua in Cameroon. *International Journal of Sciences, Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 17(1), 39-59.
- Karatop, B., Taşkan, B., Adar, E., & Kubat, C. (2020, 2020/11/04/). Decision Analysis related to the Renewable Energy Investments in Turkey Based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 106958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106958>
- Ke, S., Yu, W., Wang, T., & Ge, Y. (2019, 2019/06/01/). Aerodynamic performance and wind-induced effect of large-scale wind turbine system under yaw and wind-rain combination action. *Renewable Energy*, 136, 235-253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.123>
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., & Abbaszadeh, R. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), 188-201.
- Khalid Saeed, M., Salam, A., Rehman, A. U., & Abid Saeed, M. (2019, 2019/12/01/). Comparison of six different methods of Weibull distribution for wind power assessment: A case study for a site in the Northern region of Pakistan. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100541>
- MatLab, C. (2020). *Wind turbine*. In
- Mohd Chachuli, F. S., Mat, S., Ludin, N. A., & Sopian, K. (2021, 2021/01/01/). Performance evaluation of renewable energy R&D activities in Malaysia.

- Renewable Energy*, 163, 544-560.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.160>
- Mohseni, M., & Islam, S. M. (2011). Comparing technical connection requirements for large wind power plants. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting,
- Mosetti, G., Poloni, C., & Diviacco, B. (1994). Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1), 105-116.
- Mostafaeipour, A., Jahangiri, M., Haghani, A., Dehshiri, S. J. H., Dehshiri, S. S. H., Issakhov, A., Sedaghat, A., Saghaei, H., Akinlabi, E. T., Sichilalu, S. M., Chowdhury, S., & Techato, K. (2020, 2020/11/01/). Statistical evaluation of using the new generation of wind turbines in South Africa. *Energy Reports*, 6, 2816-2827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.035>
- Nobela, O. N., Bansal, R. C., & Justo, J. J. (2019, 2019/12/01/). A review of power quality compatibility of wind energy conversion systems with the South African utility grid. *Renewable Energy Focus*, 31, 63-72.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.10.001>
- Papi, F., Balduzzi, F., Ferrara, G., & Bianchini, A. (2021, 2021/03/01/). Uncertainty quantification on the effects of rain-induced erosion on annual energy production and performance of a Multi-MW wind turbine. *Renewable Energy*, 165, 701-715.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.071>
- Praveen, R. P., Keloth, V., Abo-Khalil, A. G., Alghamdi, A. S., Eltamaly, A. M., & Tlili, I. (2020, 2020/12/01/). An insight to the energy policy of GCC countries to meet renewable energy targets of 2030. *Energy Policy*, 147, 111864.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111864>
- Qin, C., Saunders, G., & Loth, E. (2017, 2017/09/01/). Offshore wind energy storage concept for cost-of-rated-power savings. *Applied Energy*, 201, 148-157.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.077>
- Sang, S., Wen, H., Cao, A. X., Du, X. R., Zhu, X., Shi, Q., & Qiu, C. H. (2020, 2020/11/01/). Dynamic modification method for BEM of wind turbine considering the joint action of installation angle and structural pendulum motion.

- Ocean Engineering*, 215, 107528.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107528>
- Seguro, J. V., & Lambert, T. W. (2000, 2000/03/01/). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1)
- Shu, Z. R., Li, Q. S., & Chan, P. W. (2015, 2015/10/15/). Investigation of offshore wind energy potential in Hong Kong based on Weibull distribution function. *Applied Energy*, 156, 362-373.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.027>
- Siavash, N. K., Ghobadian, B., Najafi, G., Rohani, A., Tavakoli, T., Mahmoodi, E., Mamat, R., & Mohamed, m. (2020, 2020/11/06/). Prediction of Power Generation and Rotor Angular Speed of a Small Wind Turbine Equipped to a Controllable Duct Using Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression. *Environmental Research*, 110434.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110434>
- Soulouknga, M. H., Doka, S. Y., N.Revanna, N.Djongyang, & T.C.Kofane. (2018, 2018/06/01/). Analysis of wind speed data and wind energy potential in Faya-Largeau, Chad, using Weibull distribution. *Renewable Energy*, 121, 1-8.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.002>
- Sözer, H., & Sözen, H. (2019, 2019/11/20/). Energy saving, global warming and waste recovery potential of retrofitting process for a district. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117915.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117915>
- Sun, H., Qiu, C., Lu, L., Gao, X., Chen, J., & Yang, H. (2020, 2020/12/15/). Wind turbine power modelling and optimization using artificial neural network with wind field experimental data. *Applied Energy*, 280, 115880.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115880>
- Tiam Kapen, P., Jeutho Gouajio, M., & Yemélé, D. (2020, 2020/10/01/). Analysis and efficient comparison of ten numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy potential: Application to the city of Bafoussam, Cameroon.

- Renewable Energy*, 159, 1188-1198.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.185>
- Valencia Ochoa, G., Núñez Alvarez, J., & Vanegas Chamorro, M. (2019, 2019/12/01/). Data set on wind speed, wind direction and wind probability distributions in Puerto Bolivar - Colombia. *Data in Brief*, 27, 104753.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104753>
- Vural, G. (2020, 2020/12/01/). How do output, trade, renewable energy and non-renewable energy impact carbon emissions in selected Sub-Saharan African Countries? *Resources Policy*, 69, 101840.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101840>
- Wais, P. (2017, 2017/04/01/). A review of Weibull functions in wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1099-1107.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.014>
- Wang, Q., & Liu, Y. (2020, 2020/10/05/). India's renewable energy: New insights from multi-regional input output and structural decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 124230.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124230>
- Wang, Y., Yang, E., Chen, T., Wang, J., Hu, Z., Mi, J., Pan, X., & Xu, M. (2020, 2020/12/01/). A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing. *Nano Energy*, 78, 105279.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105279>
- Wen, B., Tian, X., Zhang, Q., Dong, X., Peng, Z., Zhang, W., & Wei, K. (2019, 2019/05/01/). Wind shear effect induced by the platform pitch motion of a spar-type floating wind turbine. *Renewable Energy*, 135, 1186-1199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.034>
- Zhang, J., Zhang, M., Li, Y., Qin, J., Wei, K., & Song, L. (2020, 2020/11/20/). Analysis of wind characteristics and wind energy potential in complex mountainous region in southwest China. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123036.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123036>



Zhao, Q., Yuan, Y., Sun, W., Fan, X., Fan, P., & Ma, Z. (2020, 2020/11/01/). Reliability analysis of wind turbine blades based on non-Gaussian wind load impact competition failure model. *Measurement*, *164*, 107950.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107950>

ANEXOS

Anexo 1. Estación meteorológica inteligente Ambient Weather WS-2902C

El WS-2902C presenta un rediseño espectacular de la pantalla LCD para el muy popular WS-2902B. La estación meteorológica profesional más reciente de Ambient Weather le permite monitorear las condiciones climáticas de su hogar y patio trasero con la pantalla LCD en color brillante y fácil de leer. Monitoree las condiciones interiores y exteriores, incluida la velocidad del viento, la dirección del viento, la lluvia, los rayos UV, la radiación solar, la presión barométrica, la temperatura interior / exterior (F y C), la humedad interior / exterior, el punto de rocío, el índice de calor, la sensación térmica y más.



Especificaciones de la Estación meteorológica:

Interior

- Rango de temperatura: 14 a 140 ° F
- Precisión de temperatura: ± 2 ° F
- Resolución de temperatura: 0,1 ° F
- Rango de humedad: 10 a 99%
- Precisión de humedad: $\pm 5\%$
- Resolución de humedad: 1%

Al aire libre

- Rango del sensor de temperatura: -40 a 149 ° F
- Precisión de temperatura: ± 2 ° F
- Resolución de temperatura: 0,1 ° F
- Rango de humedad: 10 a 99%
- Precisión de humedad: $\pm 5\%$
- Resolución de humedad: 1%

Presión barométrica

- Rango: 8.85 a 32.50 inHg
- Precisión: ± 0.08 inHg (dentro del rango de 27.13 a 32.50 inHg)
- Resolución: 0,01 inHg

Radiación solar

- (Luz) Rango: 0 a 200,000 Lux
- Precisión: $\pm 15\%$
- Resolución: 1 Lux

Lluvia

- Rango: 0 a 394 pulg.
- Precisión: $\pm 10\%$
- Resolución: 0,01 pulg.

Viento

- Rango de dirección: 0 - 360 °
- Precisión de dirección: ± 1 °
- Resolución de dirección: 1 °
- Rango de velocidad: 0 a 100 mph (operativo)
- Precisión de velocidad: ± 2.2 mph o 10% (lo que sea mayor)
- Resolución de velocidad: 0,1 mph
- Cálculo de velocidad: velocidad media del viento en un período de actualización de 16 segundos
- Cálculo de ráfagas: velocidad máxima del viento en un período de actualización de 16 segundos

Anexo 2. Aerogenerador modelo: SHZOND 400W Wind Generator Hybrid Wind

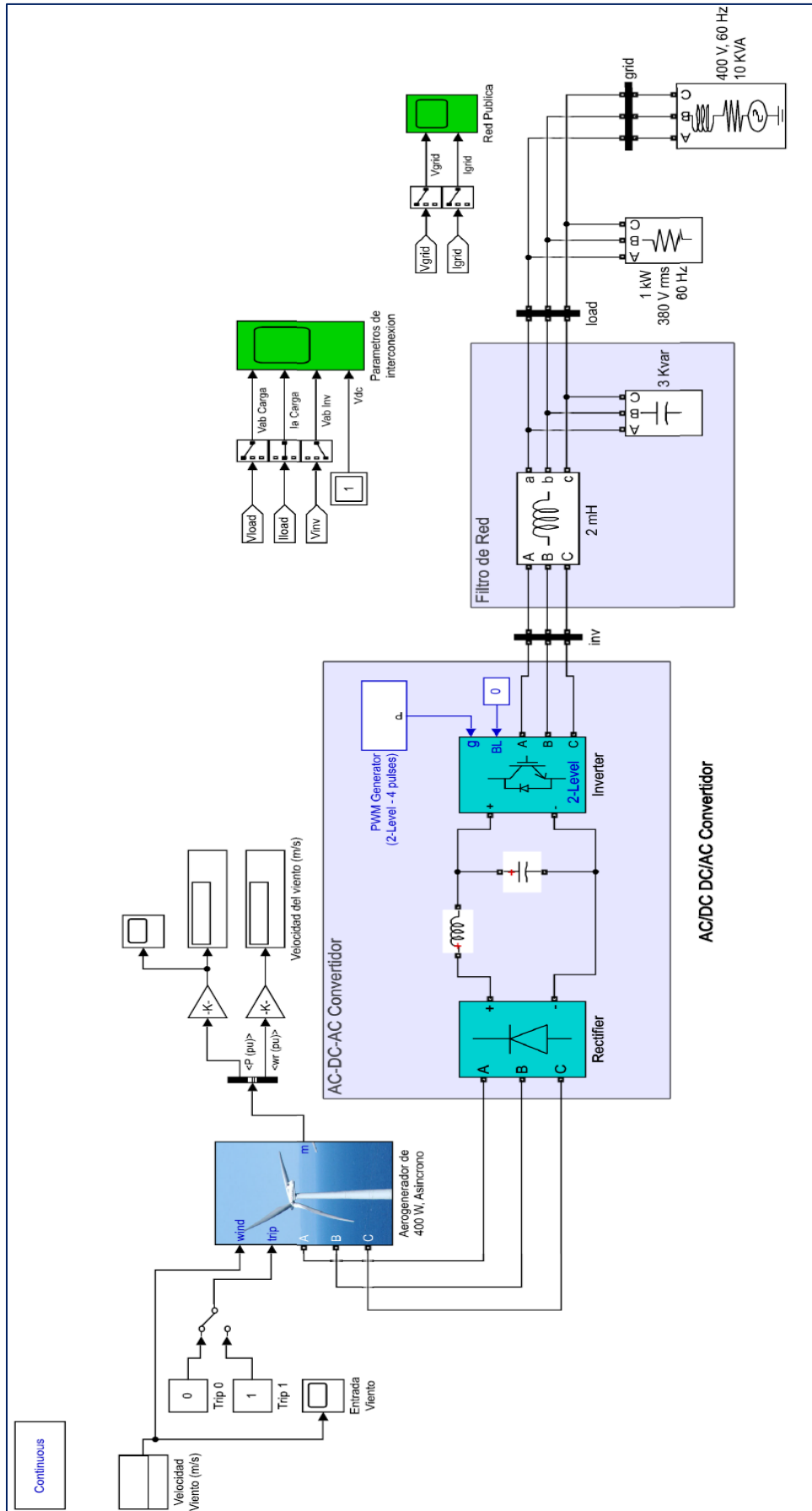
Este es un controlador híbrido de 24V para turbina eólica de 400 W. La salida máxima diaria es de 1.4KW. El controlador de carga está especialmente diseñado para cada aerogenerador individual, el diseño especial le permite obtener la mayor potencia de la turbina eólica, así como proteger su turbina eólica de la sobrecarga.

- Potencia nominal: 400 W
- Voltaje nominal: DC27-54V
- Voltaje de la batería: DC24V
- Velocidad del viento de arranque: 2,5 m/s (8 pulg/s)
- Velocidad nominal del viento: 12 m/s (35 pulg/s)
- Número de palas: 3 Material de la hoja de viento: PBT
- Diámetro del rotor: 1,2 m (4 pulgadas)
- Velocidad nominal: 800 RPM]
- Diámetro de la torre:> 80 mm (3,2 pulgadas)
- Altura de la torre: 4.5m-10m (15-33in)
- Capacidad de la batería: 200AH-400AH



Anexo 3. Diagrama de bloques del sistema eólico conectado a red simulado en SIMULINK

Sistema eólico interconectado a red del aerogenerador de 400 W, en SIMULINK:



Anexo 4. Fotografías de la estación meteorológica y el anemómetro

Estación meteorológica utilizado en la medición de los parámetros eólicos:



Estación meteorológica.



Anemómetro Amprobe - USA.