

# Análisis estadístico de la Velocidad y Dirección del Viento Basado en Modelo de Distribución Rayleigh

## Statistical Analysis of Wind Speed and Direction Based on the Rayleigh Distribution Model

DOI: 10.17981/ladee.02.02.2021.4

Fecha de recibido 19/10/2021. Fecha de aceptado 9/11/2021

**Stephany Mora**

Universidad de la Costa. Barranquilla (Colombia)  
stephany1721@gmail.com

**Francisco Tinjacá**

Universidad de la Costa. Barranquilla (Colombia)  
mftinjacab@hotmail.com

Para citar este artículo:

S. Mora y F. Tinjacá, "Análisis estadístico de la Velocidad y Dirección del Viento Basado en Modelo de Distribución Rayleigh", *LADEE*, vol. 2, no. 2, pp. 32–39, 2021. <https://doi.org/10.17981/ladee.02.02.2021.4>

*Resumen*— El propósito de esta investigación se fundamentó en realizar el análisis del comportamiento de los datos de velocidad y dirección del viento del caso en estudio propuesto. Se desarrolló el análisis mediante la función de distribución de Rayleigh y su comparativo con la metodología Weibull para los cálculos, estimación de la densidad de potencia y el poder de generación potencial del viento a través de un autogenerador determinado. Adicionalmente, se graficó mediante el Diagrama de Rosa de Viento la dirección recomendada tendiente a proponer la mejor ubicación en la instalación del sistema de generación.

*Palabras clave*— Energía eólica; densidad de potencia; distribución Rayleigh; distribución Weibull; velocidad del viento; dirección del viento; Rosa del viento

*Abstract*— The purpose of this research was based on the analysis of the behavior of the wind speed and direction data of the proposed case study. The analysis was developed using the Rayleigh distribution function and its comparison with the Weibull methodology for the calculations, estimation of the power density and the potential generation power of the wind through a given autogenerator. Additionally, the recommended direction was plotted by means of the Wind Rose Diagram to propose the best location for the installation of the generation system.

*Keywords*— Wind energy; power density; Rayleigh distribution; Weibull distribution; wind speed; wind direction; wind rose

## I. Introducción

Las energías renovables como fuentes alternativas y posibles sustitutas a futuro de energías fósiles se han convertido en una prioridad a nivel mundial, a causa del alto crecimiento de la población (en consecuencia, el crecimiento de la demanda energética) y las limitadas fuentes de energía existentes en la actualidad, por lo cual, estas juegan un papel importante para lograr objetivos de desarrollo económico sostenible y protección del medio ambiente [1].

La migración hacia fuentes más limpias y amigables con el medio ambiente hace necesario el desarrollo de estudios, investigaciones y proyectos con el fin de implementar tecnologías con fuentes renovables cada vez más competitivas en el mercado.

Particularmente la Energía Eólica o energía producida por el viento se puede considerar como una fuente inagotable existente en todas las partes del mundo, sin embargo considerada como una fuente de gran complejidad respecto a el manejo en la velocidad del viento, siendo necesario, analizar en detalle variables como tendencias a largo plazo en función de la situación geográfica, altitud y topografía, entre otras.

En las mediciones del viento, normalmente sólo interesa su parte horizontal. Su velocidad se puede medir mediante un anemómetro de cazoletas [2]. Según UNISINOS, la industria de la energía eólica es dinámica e innovadora, y está creciendo rápida y constantemente en todo el mundo, contribuyendo al desarrollo de nuevos sectores del mercado y a la creación de empleo [3].

Colombia, por su parte, inició su transición hace pocos años. En 2014 se expidió la Ley 1715<sup>1</sup> [4], la cual tenía como objetivo promover el desarrollo y la utilización de las fuentes No Convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético Nacional, despertando el interés de inversionistas en cuanto a alivios tributarios en proyectos de Fuentes No convencionales de Energía y Gestión Eficiente de la Energía [5]. El Ministerio de Minas y Energía del país lidera una estrategia de sostenibilidad, la cual para el 2022 proyecta un crecimiento desde el 1% hasta el 12.6 % en la matriz energética con fuentes no convencionales de energía, contando con un estimado de nueve proyectos eólicos en marcha [6], que componen una parte del objetivo que permitirá llegar a un estimado de 2 500 MW de capacidad instalada para la generación de energía solar y eólica [7].

La proyección para nuestro país es que al menos 65 parques eólicos funcionarán en 2031 en la Alta y Media Guajira (región con alto potencial en cuanto a Velocidad del viento aprox. 9 m/s a una altura de 80 metros), con un estimado de 2 600 aerogeneradores de energía, para producir 6 500 MW para el sistema de interconexión nacional [8].

Entendiendo el camino que debemos recorrer como país. este documento nos introduce a un ejercicio práctico que identifica las principales variables a reconocer en un proyecto de energía Eólica, su comportamiento en base a datos estadísticos, análisis y recomendaciones a tener en cuenta para un entendimiento general pero conclusivo de cuál será el mejor camino a tomar en una decisión para un proyecto de energía eólica.

## II. METODOLOGÍA

La muestra está definida para el caso de estudio propuesto con datos obtenidos por una estación meteorológica durante el periodo comprendido entre el 01/01/2016 y el 31/12/2016 con intervalos de una 1 hora por medición, identificado velocidad y dirección del viento.

El análisis de datos históricos se realiza mediante una distribución probabilística usando el modelo de Rayleigh y comparándolo con Weibull [9].

### A. Distribución de Weibull

Utilizada en múltiples aplicaciones, siendo una de ellas la distribución de la velocidad del viento. La función de densidad de probabilidad está dada por la siguiente expresión (1):

<sup>1</sup> La cual regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

$$f(x; \lambda; k) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

con  $k, \lambda > 0$

Donde  $k$ , es el parámetro de forma de la curva y  $\lambda$  corresponde al parámetro de escala.

Estos parámetros deben ser calculados dependiendo de las condiciones en cuanto a velocidad del viento esperado que variarán por el entorno y el tiempo de toma de muestra.

### B. Distribución de Rayleigh

La distribución de Rayleigh también es utilizada para determinar velocidades del viento.

En este caso, la distribución tiene una variable aleatoria (velocidad del viento) y un solo parámetro  $v_m$ . Su función de densidad de probabilidad está dada por la siguiente expresión (2).

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} * \frac{v}{v_m^2} * e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2} \quad (2)$$

De manera de determinar el parámetro se pueden utilizar los mismos métodos utilizados previamente para la distribución de Weibull, pero como bien se mencionó previamente al ser un caso particular se realiza el mismo análisis, sólo que se utiliza  $k = 2$  y  $v_m$  corresponde al parámetro  $\lambda$  en la distribución anterior.

### C. Rosa de viento

La Rosa de Vientos es un modo de representación del recurso eólico. Con un simple vistazo a este modo de gráfico conoceremos la frecuencia, valores medios de velocidad de viento y la energía en cada dirección. La Rosa de Vientos, se trata de un diagrama polar que representa el tanto por ciento de viento con la dirección indicada y, en módulo, su escala de velocidad media [10].

## II. RESULTADOS

### A. Velocidad del Viento

En la siguiente [Tabla 1](#) se muestra las características de los datos de velocidad del viento obtenidos por la estación meteorológica para el caso en estudio.

**TABLA 1.** CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO REGISTRADOS EN 2016 SEGÚN ESTACIÓN METEOROLÓGICA.

2016	Características Velocidad del Viento						
	No. Obs	Max.	Min.	Media	Des. Est	Var	K
Enero	735	11.5	3.5	4.452	1.579	2.492	1.43
Febrero	686	9.94	3.5	4.655	1.730	2.994	0.36
Marzo	735	9.94	3.5	4.582	1.568	2.458	0.34
Abril	715	21.2	3.5	4.734	2.059	4.238	12.82
Mayo	729	17.98	3.5	4.193	1.564	2.445	19.18
Junio	713	16.37	3.5	3.990	1.067	1.139	31.36
Julio	736	13.16	3.5	3.940	0.877	0.769	18.31
Agosto	741	13.16	3.5	4.137	1.209	1.461	10.95
Septiembre	714	14.77	3.5	4.080	1.207	1.456	13.75
Octubre	731	9.94	3.5	3.918	0.917	0.840	7.80
Noviembre	711	13.16	3.5	3.971	1.086	1.180	15.88
Diciembre	733	8.33	3.5	4.049	1.025	1.051	3.52

Fuente: Elaboración propia.

De la totalidad de la muestra se registraron 8769 observaciones. Los meses con velocidades promedio más alta durante el periodo de medición fueron en el mes de abril con 4.73 m/s y en el mes de febrero con 4.65 m/s, el valor más alto de velocidad del viento fue de 21.2 m/s registrado el 4 de abril.

En contraste, los meses con velocidades promedio más bajas fueron en octubre con 3.918 m/s y julio con 3.940 m/s. el mínimo valor registrado se mantuvo constante en todos los meses de 3.5 m/s.

El promedio total de la velocidad del viento para el periodo de medición del año 2016 fue de 4.22 m/s, con una desviación estándar o dispersión con respecto a la media de 1.39 y varianza de 1.94.

La media obtenida (4.22 m/s) es considerada como una Brisa Ligera de escala 3, según las Escalas de Velocidad de Viento de Beaufort (referenciadas a 10 m de altura).

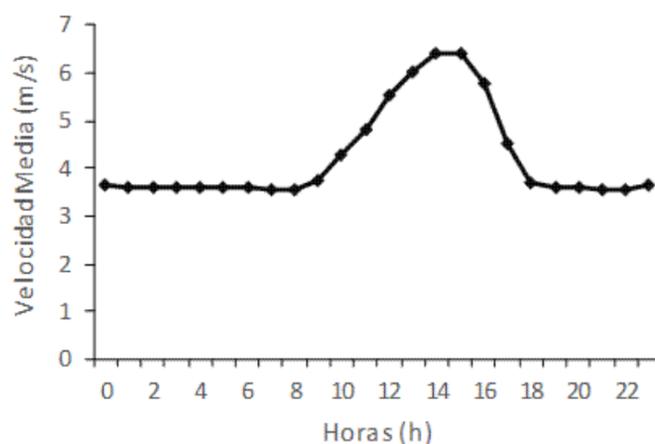


Fig. 1. Velocidad del Viento Promedio Horaria.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 1 se grafica la velocidad del viento y su variación media para cada hora del día. El rango de velocidades oscila entre 3.5 m/s y 6.41 m/s.

Las horas con velocidades promedio más altas se encuentran entre las 12 h y 16 h con valores entre 5.51 m/s y 6.41 m/s. mientras que las más bajas se encuentran entre las 6 h a 8 h y entre las 21 h a las 22 h con valores entre 5.54 m/s y 5.58 m/s.

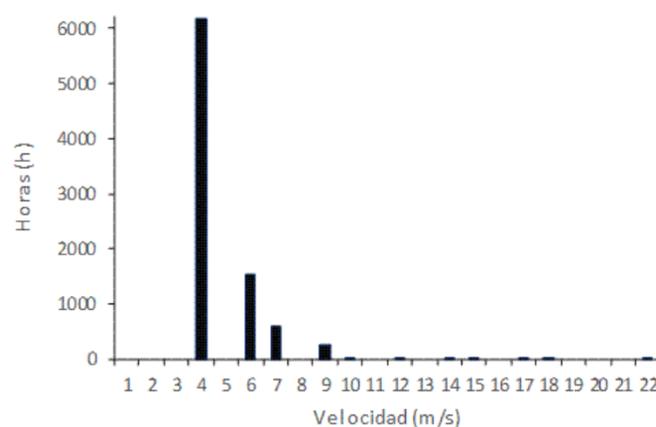


Fig. 2. Histograma de Velocidad del Viento.  
Fuente: Elaboración propia.

De la Fig. 2 se observa que la distribución de las frecuencias del viento oscila entre el rango de 3 m/s y 22 m/s. Estos a su vez se encuentran concentrados en mayor medida entre el rango de 3 m/s a 4 m/s con un valor de 6191 horas, lo que equivalen a un 71.33% de la muestra total. Sobresaliendo también, los rangos entre 5 m/s y 7 m/s con un 24.8% de las mediciones tomadas en la muestra.

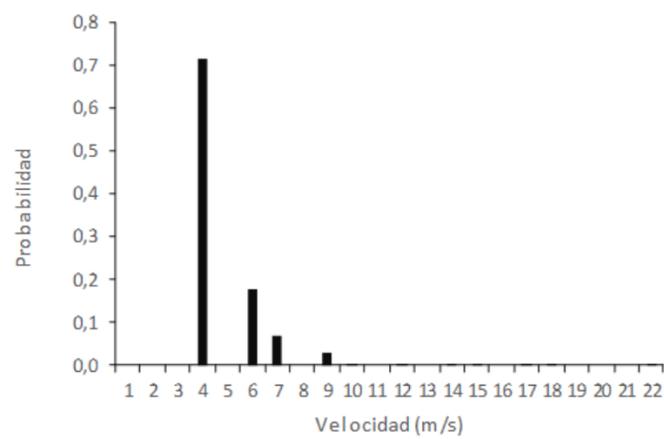


Fig. 3. Probabilidad de Velocidad del Viento.  
Fuente: Elaboración propia.

De la Fig. 3 se evidencia que la probabilidad de ocurrencia de brisa moderada de 6 m/s a 7 m/s (según las Escalas de Velocidad de Viento de Beaufort), es bastante baja, de 0.0694, es decir, tiene una probabilidad de ocurrencia de un 6.9%.

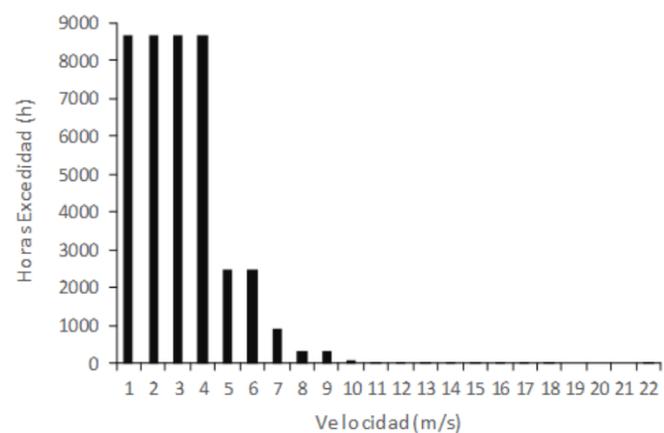


Fig. 4. Velocidad del Viento vs Horas Excedidas.  
Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades del viento comprendidas entre 1 m/s y 6 m/s presentaron una mayor concentración, con un tiempo de 39696 horas. Mientras que, las velocidades entre 8 m/s y 22 m/s fueron de poca ocurrencia presentando un tiempo de 854 horas. Estos datos son consistentes con la distribución de Rayleigh generada con la normalización de las mediciones tomadas a continuación.

En la siguiente Fig. 5 se muestra la gráfica característica de la distribución de Rayleigh, teniendo en cuenta la velocidad del viento normalizada a 100 observaciones de la totalidad de la muestra.

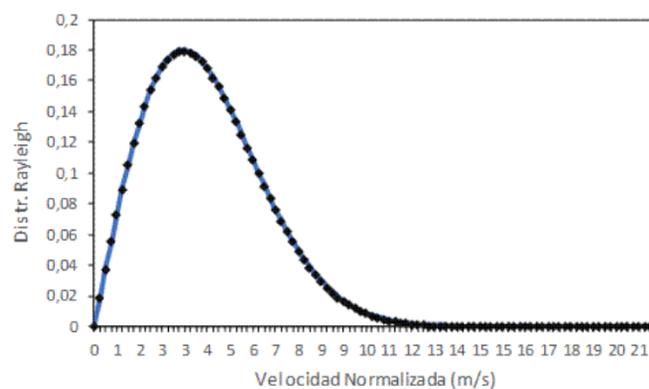


Fig. 5. Distribución de Probabilidad de Rayleigh.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 6 se muestra el comparativo entre la distribución de probabilidad de Weibull y Rayleigh con la muestra de velocidad del viento normalizada a 100 observaciones.

Para graficar la distribución de Weibull se tuvo en cuenta un  $K$  igual a 1.598 y una constante  $C$  de 3.73, datos suministrados para el ejercicio práctico.

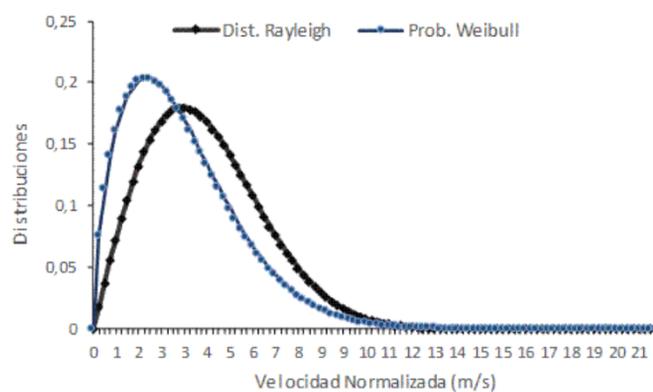


Fig. 6. Comparativo entre Distribución de Probabilidad de Rayleigh con Distribución de Probabilidad de Weibull vs Velocidad Normalizada en m/s con respecto a 100 observaciones de la muestra total.  
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el ejercicio de calcular las probabilidades tanto de la distribución de Weibull como la de Rayleigh para la muestra completa de los datos se obtuvo que el valor máximo para la distribución de Weibull fue de 0.167 y para la distribución de Rayleigh fue de 0.179. Sin embargo, como hecho relevante se obtuvo que al realizar la normalización de los datos a 100 observaciones de la muestra total para Weibull el valor máximo de probabilidad fue de 0.203 mientras que para la distribución de Rayleigh se mantuvo el mismo valor.

Para la siguiente Fig. 7, se grafica la Densidad de Potencia ( $W/m^2$ ), teniendo en cuenta una Densidad de Aire 1 de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y una Densidad de Aire 2 de  $0.8082 \text{ kg/m}^3$ .

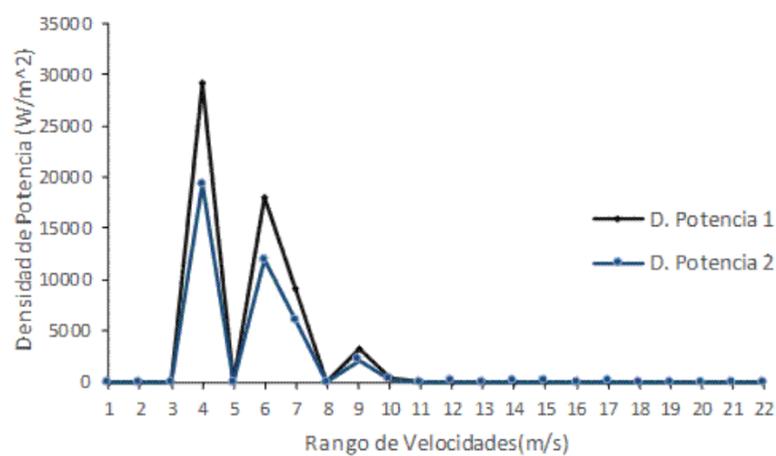


Fig. 7. Densidad de Potencia Eólica vs Velocidad Normalizada con respecto a 100 observaciones de la muestra total.  
Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia cómo la mayor cantidad de potencia eólica se encuentra entre el rango de velocidades entre 3 m/s y 5 m/s para ambos casos de densidades de aire, sin embargo, el punto máximo para la densidad de aire 1 se presentó en  $29221.46 \text{ W/m}^2$  mientras que para la densidad de aire 2 se presentó en  $19279.01 \text{ W/m}^2$ .

De lo anterior se puede intuir que, de la totalidad de la muestra del periodo analizado, el 48.79% de la densidad de potencia energética se encuentran entre dicho rango.

#### B. Dirección del Viento.

Para el análisis de la dirección del viento y su valoración a lo largo del periodo de medición se procede a graficar la Rosa de Vientos (Fig. 8):

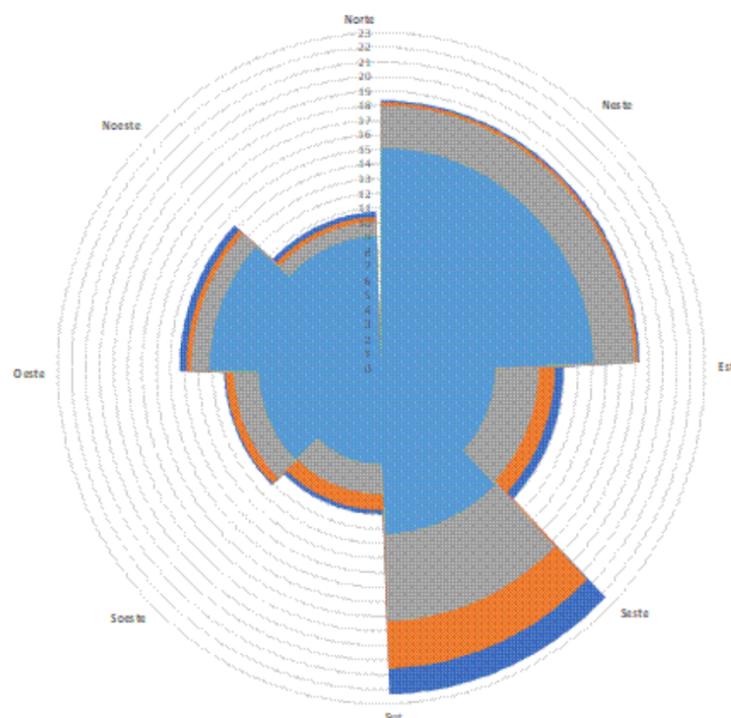


Fig. 8. Distribución dirección de velocidad de vientos.  
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos por la estación meteorológica se evidencia que la procedencia del viento en el sitio en el cual se realizó el estudio es mayoritariamente proveniente del Sureste del plano polar favoreciendo una mejor ubicación de la posición del rotor del auto generador, niveles medios de favorabilidad al Noreste y niveles bajos y por ende evitables para posicionar el sistema al Noreste y Sureste del plano.

#### Estimación *Energética*

Para el análisis de estimación de energía se toma como referencia la [Tabla 2](#) sobre Características del Aerogenerador seleccionado para el presente estudio, un equipo Bergey Windpower Co. de potencia nominal de 10 kW, se realiza el cálculo del área  $A = 38.48 \text{ m}^2$  teniendo en cuenta la sección barrida por la pala para este tipo de aerogenerador de eje horizontal.

El total de energía estimado durante el periodo de medición para una Densidad de Aire 1 de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  es igual a 557 608 kWh, mientras que para una Densidad de Aire 2 de  $0.8082 \text{ kg/m}^3$  el valor de energía estimado es de 3679 064 kWh (valores estimados para las 8 679 horas de evaluación).

TABLA 2. TABLA CARACTERÍSTICAS DE AEROGENERADOR.

Equipo Bergey Windpower Co.	
Potencia Nominal	10 kW
Velocidad Arranque	3 m/s
Velocidad Nominal	12.1 m/s
Velocidad de Abatimiento	16 m/s
No. Aspas	3
Diámetro Del Rotor	7 mts
Altura De La Torre	10 mts

Fuente: Elaboración propia.

Suponiendo que un hogar promedio en la costa colombiana consume 210 kWh/mes para una Densidad de Aire 1 de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  se puede satisfacer la demanda energética de hasta 2 203 viviendas, mientras que para una Densidad de Aire 2 de  $0.8082 \text{ kg/m}^3$  se pueden alimentar hasta 1 453 viviendas respectivamente.

## IV. CONCLUSIONES

Al analizar los datos obtenidos por medio de una estación meteorológica durante los meses de enero a diciembre del año 2016, se recopilaron en total 8 769 mediciones de velocidad de y dirección del viento con una frecuencia de mediciones horaria.

- El mayor potencial de producción de energía se encontró en los primeros meses del año, identificando los meses de vientos más elevados en febrero y abril con velocidad promedio mayores a 4.5 m/s.
- La mayor probabilidad de ocurrencia del promedio de la velocidad del viento se encuentra entre las 10 hr y las 16 hr, hallándose el valor puntual más elevando aproximadamente a las 14 hr del día.
- Los vientos se consideran como “Brisa Ligera” con velocidades estimadas de 15 Km/h, lo que lo ubica en la escala 3, en las Escalas de Velocidad de Viento de Beaumont.
- La densidad de potencia arrojó un valor de 29.22 kW/m<sup>2</sup>, para la primera referencia de densidad del aire, y 19.27 kW/m<sup>2</sup> para la segunda referencia, lo que se transfiere en 15.42 kWh/día de energía aprovechable para la primera referencia de densidad y 10.17 kWh/día para la segunda referencia de densidad.
- La mayor incidencia del viento se encuentra al Sureste del plano polar, por lo tanto, se puede obtener el mayor aprovechamiento de energía ubicando los rotores del auto generador en esta dirección.
- Los resultados indican que a nivel país, esta zona no tiene un potencial económicamente viable para un parque eólico, ya que se considera como escenario mínimo velocidades mayores a 9 m/s [11], lo cual no se evidencia en este escenario.

## REFERENCIAS

- [1] M. Li & X. Li, “Investigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada”, *Energy Convers Manag*, vol. 46, no. 18, pp. 3014–3033, Nov. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.02.011>
- [2] M. Mikatia, M. Santos y C. Armenta, “Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para analizar su dependencia de la Red Eléctrica”, *RIAI*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, Sep. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- [3] V. Sebben, J. Valle & M. Sellito, “Regional industrial policy in the wind energy sector: The case of the State of Rio Grande do Sul, Brazil”, *Energy Policy*, vol. 111, 18–27, Dec. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.050>
- [4] *Ley 1715 del 13 de mayo de 2014*. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Congreso de la República de Colombia. Recuperado de [http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)
- [5] UPME, “Guía Práctica para la Aplicación de los Incentivos Tributarios de la Ley 1715 de 2014”, IGE, BO, CO, *Cartilla*, 2015. Recuperado de [https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla\\_IGE\\_Incentivos\\_Tributarios\\_Ley1715.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf)
- [6] S. Asmar, “Las fuentes eólicas, de la mano con el Estado, le apuntan a ocupar 12,6% de la matriz en 2022”, in *La República*, Feb. 19, 2020. [En línea]. Disponible en <https://www.larepublica.co/especiales/colombia-potencia-energetica/las-fuentes-eolicas-de-la-mano-con-el-estado-le-apuntan-a-ocupar-126-de-la-matriz-en-2022-2966408>
- [7] Gov.co, “LOGROS DOS AÑOS / La transición energética ya es una realidad”, in *Presidencia de la República*. Ago 6, 2020. [En línea]. Disponible en <https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2020/LOGROS-DOS-ANIOS-La-transicion-energetica-ya-es-una-realidad-200806.aspx>
- [8] M. Ochoa, “Energía eólica: un tema de alto voltaje para los wayú”, in *Semana*. Ene. 14, 2020. [En línea]. Disponible en <https://www.semana.com/impacto/articulo/energia-eolica-un-tema-de-alto-voltaje-para-los-wayu/47189/>
- [9] J. M. Valdés y C. Vinagre, *Modelo de Previsiones de Vientos*. CL: PUC, 2012.
- [10] J. Mirez, *Energy Renewable*. CO, BO: UNI, 2011.
- [11] Y. Cardenas, Cátedra energía eólica [*Material de aula*]. Especialización en energías renovables. BQ, CO: CUC Unicosta, 2020.