

Análisis de Mediciones de Viento para Estudios de Potencial Energético a Partir de Datos de una Estación Experimental

Smith, Aidaelena Dr. , Montero, Kevin, Br , Barriola, José , Gascón, María Laura, Br 
Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela
asmith@unimet.edu.ve, kmontero@correo.unimet.edu.ve, mgascon@correo.unimet.edu.ve

Resumen— En este trabajo se desarrolla un análisis de variables de viento (velocidad y dirección) producto de registros de mediciones hechas localmente cada dos minutos a una altura de 2,1 m desde el techo de un edificio de tres pisos medidos por estación experimental diseñada y construida en laboratorios de la Universidad Metropolitana en Caracas. Dada la cantidad de datos disponibles, se usan herramientas estadísticas (Distribución y Weibull entre otras) para analizar y establecer dirección predominante y velocidades esperadas. El diseño de soluciones eólicas con más asertividad se logra cuando se tienen mediciones confiables en sitio de variables de viento a la altura en la que se desea conocer el potencial. En Caracas, y para la localidad del campus universitario, existe poca información completa (velocidad y dirección) que pueda ser usada para un diseño y cuantificación de la potencia y energía eólica disponible, por lo que el desarrollo de una estación de medición puede contribuir a mejorar esas evaluaciones de soluciones eólicas. Parte del interés de analizar las mediciones de velocidad y dirección del viento es desarrollar habilidades entre personal académico e investigador y en alumnos que pueda ser útil para el fortalecimiento de la energía eólica en Venezuela. Los resultados del análisis muestran una dirección predominante hacia el oeste y unas velocidades de 1 a 8 m/s que tienen un potencial energético equivalente superior a 2 kWh/día. Aunque la comparación con los datos de NSRDB no contribuye en el análisis, se consiguen similitudes en los gráficos resultantes de Weibull.

Palabras clave— Velocidad de viento, Energía Eólica, Potencial Eólico, Weibull, Dirección predominante.

I. INTRODUCCIÓN

Los resultados que se discuten en este trabajo son productos de una investigación que se desarrolló bajo la dirección del Centro de Desarrollo de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Metropolitana (RENOVA-UNIMET) en Caracas, Venezuela. En colaboración entre alumnos y profesores se realiza el estudio de los vientos medidos por una estación experimental construida en laboratorios de la UNIMET a partir de un diseño propio. Además, se propone una estrategia de análisis para determinar el potencial energético del viento en el lugar de medición, que luego pueda ser usado para un posible sistema eólico.

Los datos de velocidad y dirección del viento registrados cada dos minutos durante un período de tres meses por la estación experimental son analizados estadísticamente permiten por una parte identificar estrategias de tratamiento de

datos para el cálculo de potencial del viento, además de para identificar patrones de comportamiento que permitan calcular en un futuro el potencial eólico en el campus universitario. Se hace un estudio similar para mediciones de viento (velocidad y dirección) descargados de la base de datos NSRDB a una periodicidad de 60 minutos para verificar la consistencia de los datos de la estación.

Este trabajo permite establecer una base de conocimiento para la propuesta de un posible proyecto de generación híbrida, combinando el sistema fotovoltaico ya mencionado con un sistema eólico de bajo costo, adicional a un sistema de baterías que podría actuar en los momentos que se necesite. En este sentido, según el estudio bibliográfico, se tiene que lo más eficiente en el área de la generación de energía renovable es utilizar sistemas de generación híbridos. [1], [2]

La conversión de energía que ocurre en los aerogeneradores o generadores eólicos tiene como fuente el viento, entendiendo que la columna de viento incide directamente sobre el aerogenerador, resulta importante considerar la dirección, tal como se plantea. La potencia por unidad de área que transporta una columna de viento a una altura determinada es la potencia de entrada a un aerogenerador y tiene relación directa con la energía eléctrica que se produciría en ese equipo con el proceso de conversión.

Dada la relación entre la potencia disponible en el viento y la velocidad de este, un aumento en la velocidad del viento resulta en un incremento importante de la potencia que transmite esa columna de viento, asumiendo que se mantiene la dirección. [3][4]

II. METODOLOGÍA

A. Recopilación de datos

Entre las características de la estación de medición experimental destacan: registro y envío de datos cada dos (2) minutos, las 24 horas del día; la información es almacenada y publicada en formato gráfico con *ThingSpeak* usando las facilidades de *MatLab*[®]. Esta información se presenta en *ThingSpeak* en el canal público “Channel ID: 2203194” Adicionalmente, estos datos pueden ser descargados desde *ThingSpeak* para su uso. La comunicación entre la estación y una computadora se hace vía un canal dedicado de comunicación inalámbrica dentro del campus universitario. Los datos que registra la estación son: velocidad y dirección del viento, radiación a través de un fototransistor, humedad,

radiación UV, precipitaciones, presión atmosférica, irradiación en lúmenes y temperatura ambiente. De la lista de datos que forman los registros de la estación, se utilizaron en este trabajo solo la fecha y hora, velocidad (en m/s) y dirección del viento.

Según lo presentado en la bibliografía, no se tiene ningún criterio para la realización de las mediciones de los datos meteorológicos. Se presentan casos donde se realizan mediciones cada 10 segundos, 5 segundos e incluso cada 5 minutos. Es decir, el período de muestreo de la data dependerá del uso que se le quiera dar y de las limitaciones de los equipos de medición utilizados.[5], [6], [7]

Específicamente esta estación experimental se encuentra en el edificio Corimón de la Universidad Metropolitana (Latitud: 10° 29' 56" N; Longitud: 66° 47' 05" O), instalada a una altura de 2.1 desde la base del techo del edificio en el tercer piso, como se muestra en la Fig. 1. Sobre el techo de ese mismo edificio se ubica el sistema fotovoltaico de la UNIMET que soporta parte del uso de energía eléctrica del edificio y del campus universitario.



Fig. 1 Foto de la estación experimental.

La data con la cual se trabajó inicialmente fue de 11.520 registros para los días de la muestra, que, al ser promediados en 60 minutos, reduce a cerca de 400 valores analizados. Esta data corresponde a un intervalo de estudio de 3 meses (12 semanas).

Para el estudio de las mediciones de velocidad se usaron inicialmente promedios de 60 minutos a partir de mediciones en intervalos de aproximadamente dos minutos, mientras que para la dirección se realiza el estudio estadístico que permite determinar la dirección predominante (de existir) en ese período.

De esos casi 400 valores de velocidad y dirección, identificados con fecha y hora de ocurrencia, se logra identificar que la velocidad máxima registrada dentro del período bajo estudio es de 9,83 m/s y entre las velocidades bajas, el rango predominante se encuentra entre 2 m/s y 3 m/s. En fechas posteriores a la muestra usada en este estudio se han registrado velocidades de viento de hasta 29 m/s que no se incluyen en este trabajo. La dirección de viento predominante para la muestra es de dirección Oeste (O), destacando que la dirección Suroeste (SO) también resultó relevante.

Posteriormente en la Tabla I se presentan de forma concreta la velocidad máxima y mínima durante el periodo de muestreo, asimismo se presenta la dirección predominante del viento para el mismo periodo.

TABLA I
VELOCIDADES PROMEDIO ALTAS Y BAJAS Y DIRECCIÓN PREDOMINANTE

Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima predominante (m/s)	Dirección predominante
9,83	2,5	O

III. ANÁLISIS DE DATOS

A. Datos registrados

A continuación, se presentan de forma organizada los datos recabados para la presente investigación. En la Fig. 2 se presenta un histograma que cuantifica, para cada, los valores de velocidad identificados en la muestra, entendiendo que, por ejemplo, en 1 m/s se cuantifican todos los registros entre 0 m/s y 1 m/s. De este histograma se aprecia que un 21,9% de las medidas de viento están entre 0 m/s y 1 m/s. Así mismo, aproximadamente un 50% de los valores de velocidad de viento están entre 5 m/s hasta 8 m/s en el rango de estudio. Ese 50% se concentra entre las 12 pm y las 8 pm de cada día.

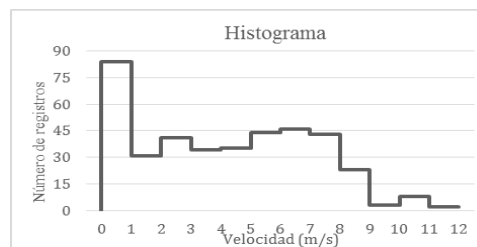


Fig. 2 Histograma de velocidades (Local)

Posterior a la extracción de los datos, se calculó la potencia por unidad de área disponible en el viento, en W/m^2 .

Del cálculo de la potencia disponible de acuerdo con las velocidades promedio de viento registradas se obtiene una potencia de $665 W/m^2$ como valor máximo y $109 W/m^2$ en promedio, estos valores se considerarán para la posible selección de aerogenerador adecuado, considerando que el límite de Betz indica que una turbina solo puede aprovechar el 59% de la energía del viento.

Luego, se realizó una rosa de los vientos con la cual se determinaron las direcciones predominantes de los vientos y la frecuencia en que los distintos intervalos de velocidades de viento s registraban en dichas direcciones. En este sentido, la Fig. 3 presenta los resultados de lo ya mencionado, en donde se contemplaron intervalos de 1 m/s y se muestra la frecuencia, en términos de porcentaje, en la que las velocidades de los vientos se presentan en cierta dirección según los registros.

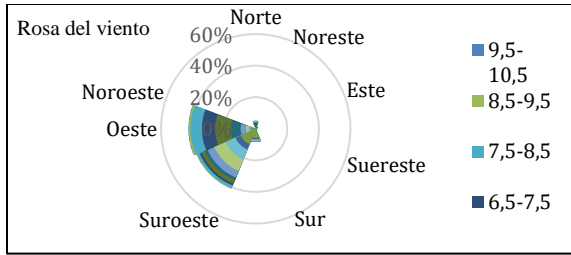


Fig. 3 Rosa del viento usando los datos de la estación experimental

Para el cálculo de la energía, se usaron los valores obtenidos de la potencia disponible en W/m^2 considerando, para cada valor de 60 minutos, que el tiempo de una hora, y se calculan valores promedio de energía por día y hora en Wh/m^2 . De acuerdo con la muestra, el valor promedio de energía para un día es de $2,28 kWh/m^2$.

B. Resultados de la distribución de Weibull

El análisis estadístico de los datos por medio de funciones de distribución constituye una acción necesaria para el tratamiento de la información de los vientos, porque permite realizar un análisis energético efectivo.

La distribución de Weibull es utilizada de forma diversa en el área de la ingeniería, donde el campo de mayor uso es el del estudio del tiempo de vida de componentes y dispositivos electrónicos, eléctricos o mecánicos. Sin embargo, según la bibliografía, en referencia a la norma IEC 61400-12 se menciona que esta norma recomienda el uso de la distribución de Weibull como la función más viable para la aproximación de los datos de viento registrados. Así mismo como resultado de su trabajo, destacan que esta distribución es el método más fiable cuando se requiere estimar el potencial eólico disponible, lo cual constituye uno de los objetivos principales de este estudio. Finalmente, también destacan que este método estadístico se puede utilizar sin importar si el conjunto de datos es limitado.[8]

La función de Weibull es una función versátil que puede utilizarse con dos o tres parámetros, los cuales son:[9]

α (alfa), parámetro de forma.

β (beta), parámetro de escala.

θ (theta), parámetro de ubicación o desplazamiento.

Para este caso bajo estudio, se usaron los parámetros de forma y escala únicamente. Para el cálculo de la distribución se deben calcular en primera instancia los valores de α y β .

El parámetro de forma corresponde al promedio de los datos, por lo que:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (1)$$

En la que v_i es cada registro de velocidad promedio de 60 minutos para la muestra y N es el número de registros de 60 minutos.

Por su parte,

$$\beta = \frac{\alpha}{e^{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})}} \quad (2)$$

En la que Γ es la función de distribución de probabilidades Gamma.

La función de Weibull se define como:

$$p(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

La Fig. 4 describe las formas estándar de la función de densidad variando únicamente el parámetro de forma; este soporte permitirá llevar a una mejor evaluación de los resultados del análisis a realizar.

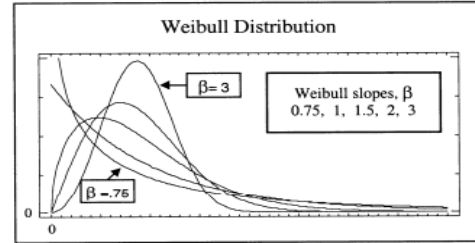


Fig. 4 Función de Distribución de Weibull[8]

Aplicando las ecuaciones anteriormente mencionadas, se calcula la distribución y se grafican los resultados que se muestran en Fig. 5. Estos resultados describen una mayor probabilidad de percibir velocidades entre 2 m/s a 4 m/s en la zona, es decir, si se planificara el montaje de una turbina eólica en el área deberán tenerse en cuenta las necesidades del generador a utilizar para que su punto más eficiente sea alrededor de estas velocidades.

Por su parte, la Fig. 6 muestra la Distribución de Weibull acumulada inversa, que refuerza lo discutido para la Fig. 5. El gráfico describe la probabilidad de que se supere alguna velocidad de viento. Si se asume como la velocidad de arranque estándar para generadores pequeños es de 4 m/s, se concluye del gráfico que este podría funcionar el 40% del tiempo, debido a que existe un 40% de probabilidad de que se alcancen/superen los 4 m/s.

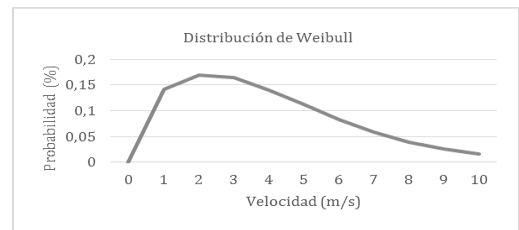


Fig. 5 Función de Distribución de Weibull con datos locales

Concluyendo este apartado, se puede apreciar la similitud entre Fig.5 mostrada en la bibliografía y Fig. 5, obtenida para el caso de estudio con parámetro de escala usado de 1,5, ya que, al realizar los cálculos, el parámetro de escala obtenido fue

1,54. Con ello se verifica que la distribución de Weibull fue aplicada de forma correcta para este caso de estudio.

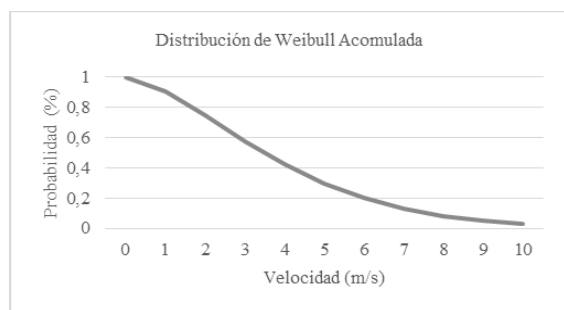


Fig. 6 Función de Distribución inversa de Weibull con datos de la estación experimental

B. Análisis de resultados y conclusiones

Luego de realizado el análisis y la interpretación de los resultados arrojados por la distribución de Weibull, se procede a destacar aquellos más relevantes para llegar a conclusiones acertadas acerca del comportamiento de los vientos en el área de estudio.

De la Fig. 5, como se mencionó con anterioridad, pero de forma más específica, la velocidad más probable que ocurra la mayor parte del tiempo se encuentra alrededor de 2 m/s, sin embargo, la variación sigue encontrándose entre 2 m/s a 4 m/s. Esto indica las características que debería tener un supuesto generador eólico sobre las condiciones nominales de trabajo.

La Fig. 6, por su parte, muestra que el rango en el que se captaría el mayor potencial eólico, por la probabilidad de ocurrencia, está entre 2 m/s y 4 m/s.

IV. ANÁLISIS COMPARATIVO

A. Datos satelitales versus datos locales

En este apartado se destacarán y analizarán los datos resultantes de la distribución de Weibull según el tratamiento realizado en el apartado anterior para los datos locales (Edificio Corimón) y el tratamiento de los datos obtenidos de forma satelital (NSRDB). Para garantizar consistencia en el análisis comparativo, el análisis se realizará en el mismo periodo de tiempo.

Para el análisis de los datos globales provistos por la NASA se realizan los mismos cálculos que se hicieron para los datos de la estación experimental y obtienen los siguientes resultados.

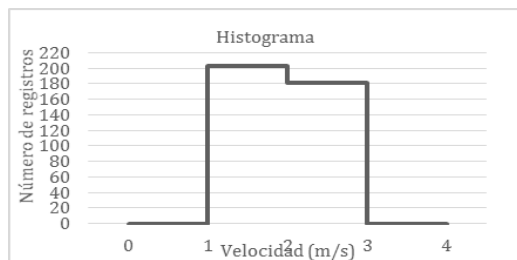


Fig. 7 Histograma de velocidades con datos de NSRDB para la misma ubicación de la estación experimental

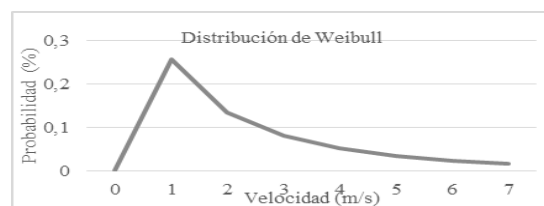


Fig. 8 Función de Distribución de Weibull con datos de NSRDB

Se puede observar que los datos en la Fig. 7 no presentan una variación significativa en el registro de las velocidades, todos los registros oscilan entre 1 m/s y 2 m/s, a diferencia de la medición local en la cual la variación en el registro de valores es mayor.

En cuanto a la distribución de Weibull (Fig. 8 para datos de NSRDB), para ambos casos, los resultados obtenidos siguen una forma consistente según lo que plantea en su artículo donde realiza una revisión de la distribución de Weibull, haciendo énfasis en las formas de las curvas resultantes según los parámetros de forma y escala. [2] [8]

De acuerdo al análisis, es probable que las velocidades de viento alcancen los 5 m/s de forma constante en ciertos períodos de tiempo. Por su parte se tiene que para la Fig. 9 se tiene un 31% de probabilidad de que las velocidades de los vientos superen los 2 m/s. Esto quiere decir, que si se desea realizar el cálculo del potencial eólico de un área considerando los vientos capturados en la misma el resultado más certero será aquél que se mida más cercano al punto en el que se desea realizar el estudio o el proyecto. Para este caso particular, las mediciones del NSRDB se realizan a aproximadamente 1km de altura y las de la estación meteorológica casera, a solo unos metros del área de estudio.

V. POTENCIAL EÓLICO

Según resultados de la curva de densidad de la Fig. 9, se aprecia que la mayor potencia es obtenida entre las velocidades de 6 m/s a 8 m/s siendo el punto de mayor potencia alcanzado, cuando se tienen vientos de 7 m/s. Cabe destacar que estos resultados parten únicamente de las casi 400 muestras analizadas.

La Tabla II resume de forma concreta la energía que hubiera podido ser generada en el área de estudio y el período de tiempo analizado. También se tiene la estimación de la energía, según la distribución de Weibull para las velocidades de los vientos. Estos datos se comparan según un intervalo de tiempo.

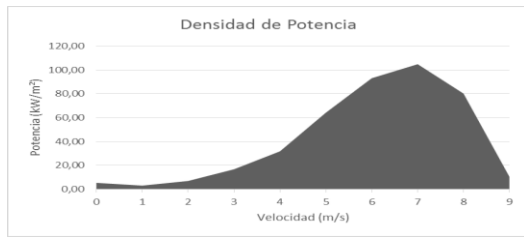


Fig. 9 Curva de densidad de potencia

En la Tabla II se aprecia que la energía que es probable generar, según el análisis estadístico, es menor pero comparable a la energía que se hubiera generado en área de estudio en el caso de que se tuvieran los equipos para ello todo esto en los intervalos de tiempo indicado.

De forma detallada, lo que pretende esta Tabla II es indicar que si durante los días del estudio, se hubiera tenido un sistema para aprovechar el potencial eólico del viento, se hubieran podido generar, según la límite de Betz, el 59% de la energía calculada, lo que ser unos 21,5 kWh, pero de forma general, para esa misma área, si se pretendiera construir, en un futuro, un sistema de aprovechamiento eólico, se podría decir que en un período de muestra, se podrían generar una cantidad de energía cerca a los 19,2 kWh.

Se puede esperar percibir en el área de estudio, entre un rango de 14% a 50% del tiempo que las velocidades de los vientos se encuentren entre 2 m/s a 4 m/s, de forma sostenida o constante.

Si bien de forma sostenida se espera un comportamiento regular de entre 2 m/s a 4m/s, en un intervalo de tiempo existiría un 2% de probabilidad de que el viento supere los 4 m/s.

TABLA II
RESUMEN DEL CÁLCULO ENERGÉTICO DEL VIENTO

Energía (kWh)	Energía Estimada (kWh) Weibull	Frecuencia
36,5	32,53	16 días
2,28	2,03	1 día
0,095	0.085	1 hora

VI. CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo a lo presentado en el análisis de resultados de las muestras de velocidades y dirección del viento durante 3 meses, se puede concluir que la implementación de un generador eólico en el techo del edificio donde actualmente se ubica la estación experimental, permitiría generar un total de hasta 1,2 kWh/día, con vientos de poca velocidad, en dirección predominante hacia el oeste que favorece la orientación de un aerogenerador fijo en esa dirección. Dado que los valores esperados de energía a generar son muchos más bajos que la energía que se consume en el edificio, la solución eólica se

propone acompañar en la solución, la generación eólica con un sistema de almacenamiento que permita almacenar energía generada por el aerogenerador para que pueda ser liberada en el momento en que sea mejor aprovechada para disminuir los valores de demanda máxima en el edificio.

REFERENCIAS

- [1] P. Roy, J. He, T. Zhao, y Y. V. Singh, «Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review», *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3. 2022. doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [2] O. Babatunde, I. Denwigwe, O. Oyeboode, D. Ighravwe, A. Ohiaeri, y D. Babatunde, «Assessing the use of hybrid renewable energy system with battery storage for power generation in a University in Nigeria», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, n.º 3, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15151-3.
- [3] Dale E. Berg, *Energy Conversion*, 2nd Edition. 2017.
- [4] D. PEREZ MONTES, A. De Ávila Solano, y J. JIMENEZ CARDOZO, «Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos», *LADEE*, vol. 3, n.º 1, 2022, doi: 10.17981/ladee.03.01.2022.4.
- [5] F. Guerra Hidalgo, R. Faez Martínez, y E. Fuentealba Vidal, «Design of a Low-Cost Sensor for Solar Irradiance», *Oceanoptics.Com*, 2013.
- [6] I. H. Rosma, Di. Y. Sukma, I. T. Ali, y A. K. Perdana, «Automatic solar station for ground-based measurement of solar energy resource in Pekanbaru City Indonesia», en *Proceedings - 2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics: Advancing Knowledge, Research, and Technology for Humanity, ICELTICS 2017*, 2017. doi: 10.1109/ICELTICS.2017.8253252.
- [7] P. B. Leelavinodhan, M. Vecchio, F. Antonelli, A. Maestrini, y D. Brunelli, «Design and implementation of an energy-efficient weather station for wind data collection†», *Sensors*, vol. 21, n.º 11, 2021, doi: 10.3390/s21113831.
- [8] S. N. Luko, «A review of the weibull distribution and selected engineering applications», en *SAE Technical Papers*, 1999. doi: 10.4271/1999-01-2859.
- [9] S. N. Luko, «A review of the weibull distribution and selected engineering applications», en *SAE Technical Papers*, 1999. doi: 10.4271/1999-01-2859.