

## **Análisis estadístico del viento como recurso energético**

Arturo Hernández Rosales, Oswaldo René Ortega Vega  
Instituto Politécnico Nacional, ESIA Ticomán "Ciencias de la Tierra", D.F, México,  
ahernandezro@ipn.mx

El viento, entendido como recurso, desempeña un papel importante en el desarrollo del aprovechamiento energético. Cuando se habla de energía eólica se hace referencia a la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas.

Dentro del marco de las energías alternativas, la energía eólica ofrece un importante potencial para el suministro de cantidades sustanciales de electricidad sin la contaminación que presentan la mayoría de las formas convencionales de generación de energía.

Por tal motivo, se realizó un análisis estadístico del viento como recurso eólico. Para este fin, se llevó a cabo la programación de un modelo computacional en Matlab que toma en cuenta diversas consideraciones teóricas para la estimación del potencial generador de energía eólica, calculándose el perfil vertical del viento hasta 200m de altura a partir de la Ley Exponencial de Hellman y propiedades logarítmicas que relacionan las velocidades del viento a distintas alturas mediante un coeficiente y/o longitud de rugosidad, además de las distribuciones de Weibull y Rayleigh.

### **El viento como recurso eólico**

El viento es una de las principales variables meteorológicas que actúa como motor principal en la generación de fenómenos meteorológicos. El viento se define como el aire en movimiento y este posee dos componentes: horizontal (advección) y vertical (convección). Existen tres principales factores que influyen en el viento: presión, fuerza desviadora de Coriolis, y fuerza de fricción.

El desequilibrio creado por la diferencia de presión entre dos zonas de la atmósfera tiende a equilibrarse mediante un desplazamiento de aire de la zona de mayor presión a otra de menor presión. La velocidad del viento es directamente proporcional al gradiente de presión. Esto significa que habrá mayor ocurrencia de vientos con altas velocidades en las regiones que presenten un notable gradiente de presión.

Es de nuestro conocimiento que el calentamiento de la Tierra es muy variante en ciertas latitudes, esto se debe a que la radiación solar que incide es perpendicular en las regiones ecuatoriales, y en menor proporción en las zonas polares. Debido a este desigual calentamiento del planeta existen diversos cinturones de presión dan lugar a la circulación general del viento.

Debido a la rotación de la Tierra se produce una fuerza (Coriolis) tendiente a modificar la dirección del movimiento de los flujos atmosféricos, hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. La desviación es proporcional a la velocidad del viento, dando como resultado la siguiente relación matemática:

$$f = 2\Omega \sin\varphi \tag{1}$$

Dónde:

$f$  = parámetro de Coriolis.

$\Omega$  = velocidad angular de la Tierra.

$\varphi$  = latitud.

## Variación horizontal

Es sabido que a gran altura de la superficie terrestre, está apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmosfera, las velocidades del viento se modifican debido al efecto de fricción con la superficie, es decir, la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del área.

El flujo de viento originado por la circulación global se conoce como viento de escala macro (100-10,000km). La escala horizontal de movimiento de estos vientos va desde algunos cientos a miles de kilómetros. El viento de escala macro no es perturbado por características de la superficie terrestre, excepto por cadenas montañosas. Además, se encuentra en altitudes superiores a los 1000m.

Las variaciones de la superficie terrestre con escala horizontal de 10 a 100km, tienen una influencia en el flujo de viento entre los 100 y 1,000 metros de altura sobre el terreno. Obviamente, la topografía es importante y los vientos tienden a fluir por encima y alrededor de montañas y colinas. Cualquier otro obstáculo (rugosidad) sobre la superficie terrestre de gran tamaño desacelera el flujo del viento.

En una escala micro, los vientos de superficie (entre 60 y 100 metros sobre el terreno), son los más importantes para la aplicación directa de la conversión de la energía eólica. Este tipo de vientos son influenciados por las condiciones locales de la superficie, como la rugosidad del terreno (cobertura vegetal, edificios, etc.)

## Rugosidad

La velocidad del viento se ve directamente influenciada por la rugosidad del terreno con el que está en contacto directo, es decir, mientras más pronunciada sea la rugosidad del terreno, mayor será la disminución que experimente el viento. El factor de rugosidad actúa en función de la clase de objetos que se encuentren al paso del viento y que puedan influir en su trayecto o velocidad. Podemos hacer referencia a clase de rugosidad o longitud de rugosidad cuando se trata de evaluar las condiciones eólicas de un determinado lugar. El termino longitud de rugosidad se refiere a la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser nula.

La elección del coeficiente de rugosidad a tomar en cuenta en la estructura del modelo, se basó en la asignación de valores preestablecidos en tablas de rugosidades existentes, tomando en cuenta la ubicación geográfica del sitio de interés por medio de imágenes satelitales, y la integración de datos de naturaleza geológico superficial.

## Cizalladura del viento

La cizalladura del viento es una descripción del cambio en la velocidad horizontal del viento con la altura. La magnitud de la cizalladura del viento es específica para el sitio y depende de la dirección del viento, de la velocidad del viento y de la estabilidad atmosférica.

## Distribución de frecuencia de la velocidad del viento

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. La distribución de frecuencia de la velocidad del viento caracteriza al viento en un lugar dado de dos maneras. Primero, la distribución de frecuencia determina con qué frecuencia se observa una cierta velocidad del viento en ese lugar y segundo, identifica el rango de velocidades del viento observado en dicho lugar. Este análisis con frecuencia se obtiene ordenando las observaciones de velocidad del viento en bins de 1 metro por segundo (m/s) y calculando el porcentaje de cada bin.

Las velocidades del viento pueden ser calculadas como un promedio o expresadas como un valor instantáneo. Generalmente se utilizan intervalos para promediar la velocidad del viento de 1 o 2 minutos (observaciones del clima), 10 minutos (la norma para programas de monitoreo de energía eólica), por hora, mensuales y anuales. Es importante conocer la altura de medición para una velocidad del viento dada, debido a la variación de la velocidad del viento con la altura.

Las observaciones de la dirección del viento en estaciones meteorológicas a menudo se basan en una brújula de 36 puntos (cada 10 grados). La distribución de la dirección del viento con frecuencia se presenta como una rosa de los vientos (una gráfica de la frecuencia de ocurrencia por dirección). Las rosas de los vientos también pueden representar cantidades tales como la velocidad promedio o el porcentaje de potencia disponible en cada dirección.

La distribución de la velocidad del viento es importante porque los sitios con idénticas velocidades promedio del viento pero diferentes distribuciones pueden resultar en un recurso eólico disponible sustancialmente diferente. Estas diferencias pueden corresponder a un factor de hasta dos o tres. Dentro del análisis probabilístico en los modelos estadísticos constituye una fuente de información bastante relevante el saber cómo distribuye la velocidad del viento, para así poder estimar de mejor manera el comportamiento en un determinado período de tiempo y así implementar un modelo lo más aproximado a la realidad.

## Funciones de distribución de Weibull y Rayleigh

Como herramienta estadística principal el modelo emplea la distribución de Weibull para caracterizar la amplitud de la distribución de velocidades del viento. Las siguientes ecuaciones dan la función de distribución de probabilidad y la función de distribución acumulativa de la distribución de Weibull de dos parámetros:

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

Dónde:

$U$  = velocidad del viento.

$c$  = factor de escala de Weibull, el cual típicamente se relaciona con la velocidad promedio del viento por medio del factor de forma expresado en m/s.

$k$  = factor de forma Weibull, el cual describe la distribución de las velocidades del viento.

El valor de  $k$  refleja la amplitud de la distribución; mientras más amplia sea la distribución, menor será el valor de  $k$ . En la función de distribución de Weibull es importante determinar los parámetros  $c$  y  $k$ , por lo que es necesario recoger los datos de la velocidad del viento en cortos intervalos de tiempo. Si disponemos solamente de la velocidad media del viento en un periodo largo de tiempo, en un día, una semana, un mes, es más adecuado utilizar la distribución de Rayleigh.

La forma funcional de la distribución de Rayleigh es:

$$f(x) = \frac{2x}{b^2} \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) \quad (4)$$

La función  $f(x)$  representa la probabilidad de que la velocidad del viento  $x$  esté en un intervalo entre  $x$  y  $x+dx$ . El área bajo  $f(x)$  es la unidad. Podemos apreciar que la función de distribución de Rayleigh es un caso particular de la de Weibull para  $k=2$ .

El valor medio de la velocidad  $x$  se determina mediante una integral definida de la siguiente manera:

$$x = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} b \quad (5)$$

### Ecuaciones para el cálculo del perfil vertical del viento

Al determinar la cizalladura del viento, se puede extrapolar datos existentes del viento a otras alturas. En nuestro estudio la extrapolación se llevó a cabo hasta 200m de altura sobre el nivel del suelo debido a que la influencia de la rugosidad en el viento en este umbral es prácticamente nula y los aerogeneradores tienen una altura significativa (dicha altura depende de las características del aerogenerador y del diámetro de sus turbinas) para un mejor aprovechamiento del contenido energético del viento.

La fórmula más simple para el cálculo del perfil vertical del viento está determinada por la Ley exponencial de Hellman, que relaciona las velocidades del viento a diferentes alturas, que se expresa de la forma:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha} \quad (6)$$

Dónde:

$v$  = velocidad a la altura  $H$ .

$v_0$  = velocidad a la altura  $H_0$ .

$\alpha$  = coeficiente de fricción o exponente de Hellman.

Otra forma de calcular el perfil vertical del viento es a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{v_{ref} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (7)$$

Dónde:

$v$  = velocidad del viento a una altura  $z$  conocida, sobre el nivel del suelo.

$v_{ref}$  = velocidad de referencia, es decir, una velocidad del viento ya conocida a una altura ( $z_{ref}$ ).

$z$  = altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada  $v$ .

$z_0$  = longitud de rugosidad en la dirección de viento actual.

### Estimación de la densidad de potencia del viento

Debido a que la densidad de potencia disponible en el viento proporciona una determinación más real del potencial de energético de un sitio, expresando la energía eólica promedio sobre un metro cuadrado ( $W/m^2$ ). La densidad de potencia es proporcional a la suma del cubo de la velocidad instantánea (o promedio a corto plazo) del viento y la densidad del viento. Debido a este término cúbico, dos sitios con la misma velocidad promedio del viento pero con diferentes distribuciones pueden tener valores muy diferentes de densidad de potencia. La densidad de potencia disponible en el viento, en unidades de  $W/m^2$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$WPD = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (8)$$

Dónde:

$\frac{P}{A}$  = densidad de potencia del viento  $W/m^2$ .

$\rho$  = densidad del viento en  $kg/m^3$ .

$v$  = el cubo de la velocidad del viento  $m/s$ .

Otra manera de calcular la densidad de potencia del viento es la siguiente:

$$WPD = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 \quad (9)$$

Dónde:

$WPD$  = densidad de potencia del viento en  $W/m^2$

$n$  = número de registros en el intervalo utilizado para el promedio.

$\rho$  = densidad del viento ( $kg/m^3$ ) en una hora particular de observación.

$v_i^3$  = el cubo de la velocidad del viento ( $m/s$ ) a la misma hora de observación.

Es recomendable que esta ecuación se utilice únicamente para registros individuales de medición (por hora, cada 10 minutos). Utilizar esta ecuación con promedios a largo plazo introduce incertidumbre en la estimación de la densidad de potencia debido a que los promedios a largo plazo no contemplan los registros de velocidades altas que contribuirían a una estimación más detallada.

El modelo considera múltiples aproximaciones numéricas que dependen de algunas variables meteorológicas tales como: presión, temperatura, velocidad y dirección del viento, presentes en los datos. El modelo se alimentó directamente con datos de una estación meteorológica automática proporcionados por Comisión Federal de Electricidad (CFE), con un periodo comprendido entre los años 1996-2013.

Las variables meteorológicas fundamentales que intervienen en el cálculo del recurso eólico son la velocidad y dirección del viento, además, la temperatura y presión son de utilidad en el cálculo de la densidad del viento. Se aplicaron diversos filtros a los datos, eliminando los valores incongruentes presentes en la base de datos. Frecuentemente las estaciones meteorológicas presentan irregularidades debidas a problemas operativos (falta de mantenimiento y calibración de las estaciones meteorológicas) que hace que se tenga ausencia de datos durante periodos prolongados de tiempo.

### Densidad del viento

Existen diversas formas de calcular la densidad del viento de acuerdo a las variables con las que se cuenten en los datos. Por ejemplo, en nuestro estudio se conoce la presión y la temperatura del sitio; por lo tanto, se procede a calcular la densidad del viento mediante la siguiente formulación matemática:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (10)$$

Dónde:

- $\rho$  = densidad del viento en kg/m<sup>3</sup>.
- $P$  = presión del aire (Pa o N/m<sup>2</sup>).
- $R$  = constante universal de los gases (aire).
- $T$  = temperatura del aire en grados Kelvin (°C+273).

Si el dato de presión del sitio no se encuentra disponible, la densidad del viento puede calcularse tomando en cuenta la elevación y la temperatura del sitio, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\rho = \left( \frac{P_0}{R \cdot T} \right) e^{\left( \frac{-g \cdot z}{R \cdot T} \right)} \quad (11)$$

- $\rho$  = densidad del viento en kg/m<sup>3</sup>.
- $P_0$  = presión atmosférica estándar a nivel del mar o la lectura de presión real ajustada a nivel del mar desde un aeropuerto local.
- $g$  = constante gravitacional (9.81m/s<sup>2</sup>).
- $z$  = elevación del sitio sobre el nivel del mar (m).
- $R$  = constante universal de los gases (aire).

Sustituyendo los valores que son constantes  $P_0$ ,  $R$  y  $g$  en la formula anterior, la ecuación se reduce a:

$$\rho = \left( \frac{353.05}{T} \right) e^{-0.034 \left( \frac{z}{T} \right)} \quad (12)$$

En dado caso de que no se tengan datos de presión y temperatura, se puede considerar que a una presión atmosférica normal, con una temperatura de 15°C, el aire pesa aproximadamente 1.225kg/m<sup>3</sup>, valor que puede ser utilizado en estimación del potencial eólico. Es pertinente señalar que la densidad del viento cambia constantemente de acuerdo a las condiciones atmosféricas determinadas por las variables de estado.

### Resultados numéricos

Los resultados muestran que la correcta caracterización del coeficiente de rugosidad es fundamental en el cálculo del perfil vertical del viento, ya que una ligera variación en él se manifestaría como una errónea estimación de la densidad de potencia del viento.

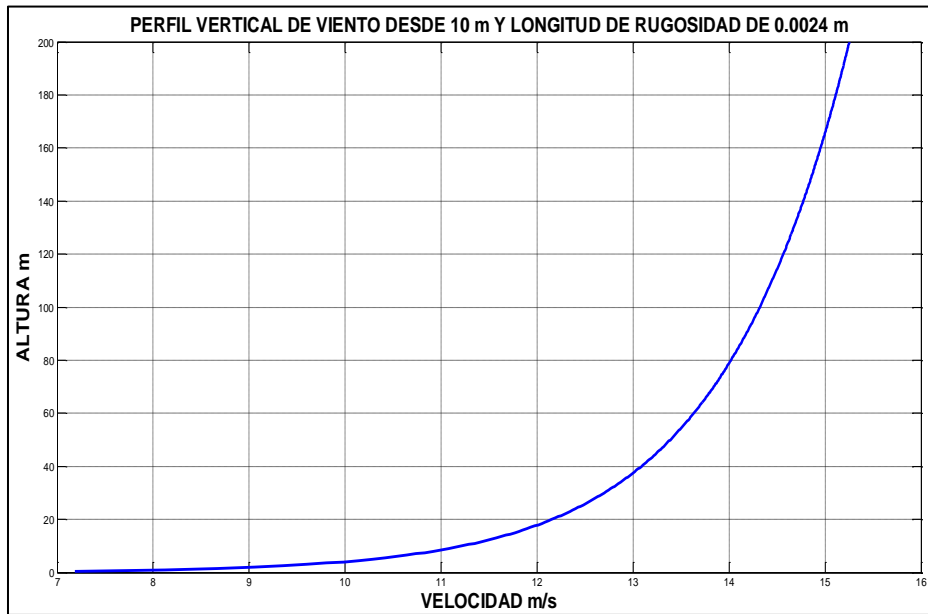


Fig.1. Perfil vertical del viento (hasta 200m) de la estación MMGL, MATLAB.

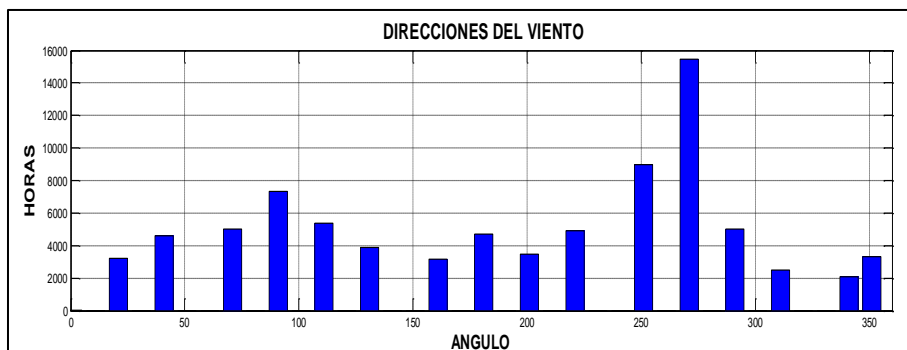


Fig.2. Direcciones del viento de la estación MMGL, MATLAB

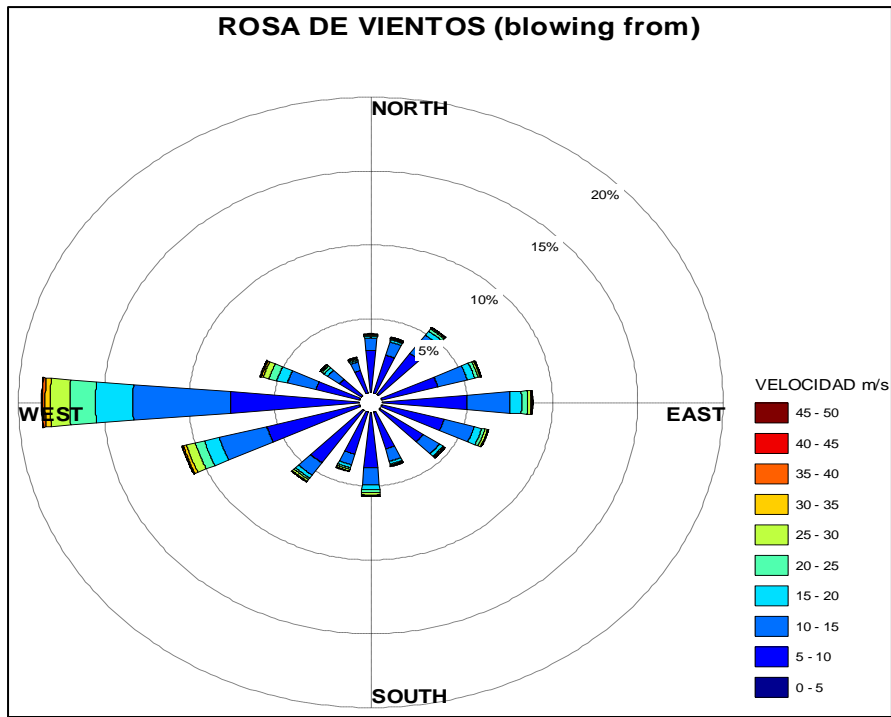


Fig.3. Rosa de vientos de la estación MMGL, MATLAB.

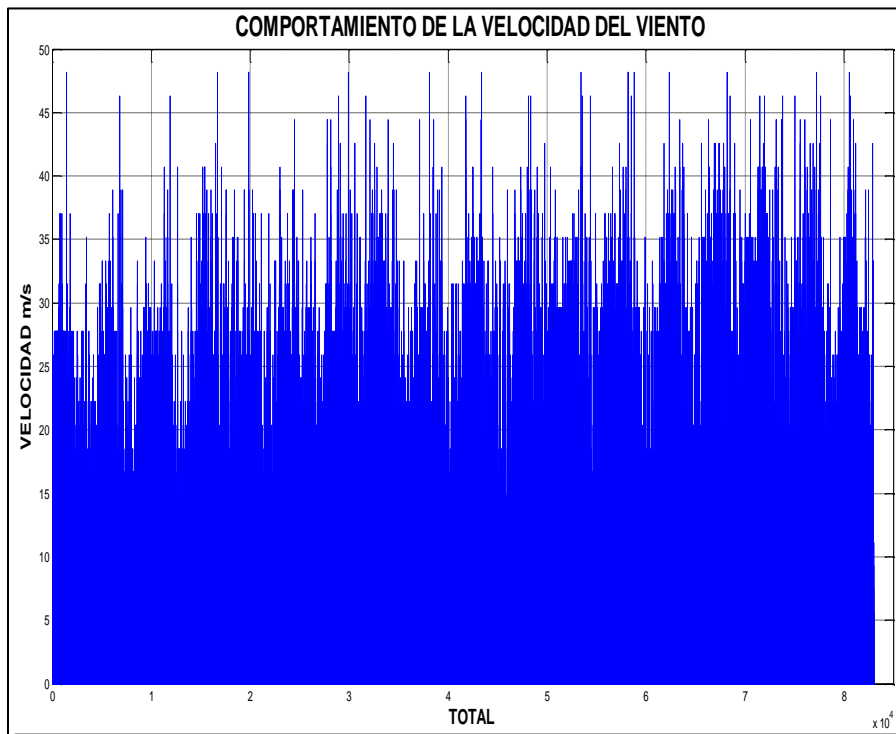


Fig.4. Series de Tiempo de la estación MMGL, MATLAB.



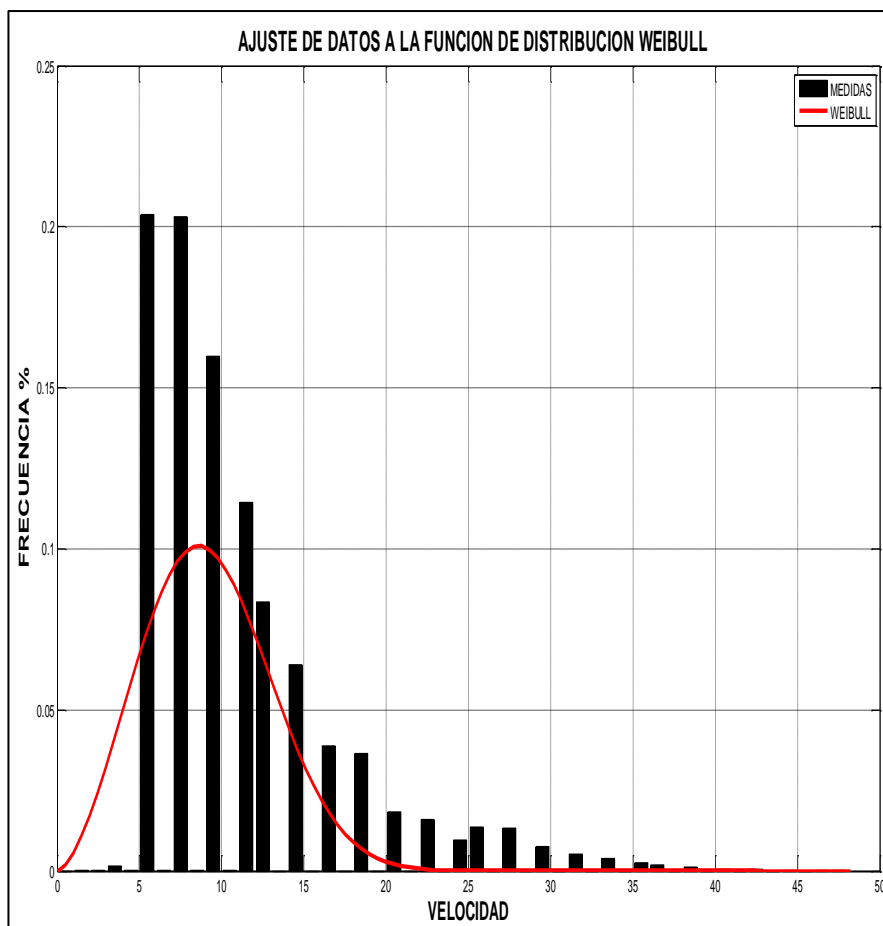


Fig.5. Función de distribución de Weibull de la estación MMGL, MATLAB.

MMGL	VELOCIDAD PROMEDIO DIRECTO DE LOS DATOS m/s	VELOCIDAD DESVIACIÓN ESTÁNDAR DIRECTO DE LOS DATOS m/s	PARÁMETRO WEIBULL K	PARÁMETRO WEIBULL C	DENSIDAD PROMEDIO CONSIDERANDO PRESIÓN Y TEMPERATURA kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD PROMEDIO CONSIDERANDO ELEVACIÓN Y TEMPERATURA kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD PROMEDIO A PRESIÓN ATM ESTANDAR kg/m <sup>3</sup>	POTENCIA DISPONIBLE CONSIDERANDO PRESIÓN Y TEMPERATURA W/m <sup>2</sup>	POTENCIA DISPONIBLE CONSIDERANDO ELEVACIÓN Y TEMPERATURA W/m <sup>2</sup>	POTENCIA DISPONIBLE CON FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN WEIBULL W/m <sup>2</sup>	VELOCIDAD PROMEDIO DEL PERFIL VERTICAL A 200 m m/s	POTENCIA DISPONIBLE DIRECTO DEL PERFIL VERTICAL A 200m W/m <sup>2</sup>	POTENCIA DISPONIBLE DEL PERFIL DISTRIBUCIÓN WEIBULL W/m <sup>2</sup>
1996-2013	11.22012482	6.12375292	2.6063	10.349	1.20097246	0.9973221	1.225	1829.927582	1535.784935	1299.251591	13.91988791	1660.061345	2480.889415
2013	12.04141697	7.14232864	2.253	10.7482	1.18432657	0.99558236	1.225	2430.999406	2046.420145	1769.516471	14.93879767	2023.495684	3378.848808
ENERO	9.75860349	5.27341749	2.882	8.5287	1.22099995	1.0115718	1.225	1213.588796	1016.08865	815.2478617	12.10669836	1110.392926	1556.696029
FEBRERO	13.56073446	7.38481794	1.9231	13.6877	1.19954735	0.99589177	1.225	2997.667004	2521.748528	2974.082395	16.82369017	2927.285321	5678.938121
MARZO	14.06281513	8.13930449	2.0834	13.1891	1.20351506	0.99857076	1.225	3693.296069	3102.857629	3071.822585	17.44658045	3275.415164	5865.570768
ABRIL	16.59597586	9.27749748	1.7081	18.1843	1.19017615	0.98956852	1.225	5470.97044	4620.501333	6197.318458	20.58926504	5323.749963	11833.62938
MAYO	11.63085106	6.3301295	2.3984	10.8357	1.19396517	0.99175383	1.225	1970.005724	1662.687051	1528.410285	14.42944224	1838.33292	2918.462386
JUNIO	10.34492187	4.93032767	2.5817	10.2628	1.1977712	0.9943966	1.225	1196.918285	999.0382541	1022.251623	12.83409545	1297.63794	1951.964692
JULIO	9.74493834	4.62239789	2.9111	9.1371	1.19972139	0.99889109	1.225	1012.723653	855.5916243	792.8832457	12.08907519	1086.284325	1513.991338
AGOSTO	11.22878788	5.65272612	2.4858	10.9284	1.19532486	0.99768633	1.225	1622.000277	1356.040997	1340.294161	13.93063546	1656.084944	2559.259211
SEPTIEMBRE	11.29212828	6.23598985	2.4767	10.2247	1.19282975	0.99809314	1.225	1850.382258	1554.594485	1363.933993	14.00921669	1680.753	2604.398782
OCTUBRE	8.90954064	4.50393218	2.5433	8.406	1.13960662	0.98874018	1.225	820.8231821	683.263403	627.8865516	11.05333577	788.712868	1198.934152
NOVIEMBRE	9.62947977	5.53584496	2.1947	9.3431	0.98085275	0.97312289	1.225	1202.319496	999.4659189	766.6098063	11.94650516	857.0581971	1463.822843
ESTACIONES													
DEF-INVIERNO	11.03057269	6.12516631	2.4937	9.6706	1.21178533	1.00489199	1.225	1738.184336	1463.655799	1285.090621	13.68472614	1591.541241	2453.849391
MAM-PRIMAVERA	14.51952191	8.47243168	1.9033	14.108	1.19608677	0.99347396	1.225	4010.058049	3382.123328	3680.335979	18.01317906	3582.759526	7027.512334
JJA-VERANO	10.46136662	5.13157206	2.6223	10.0992	1.19754014	0.99699287	1.225	1286.051977	1077.467371	1045.704793	12.97855889	1341.693667	1996.747952
SON-OTOÑO	10.08823529	5.62149801	2.4074	9.3863	1.1280811	0.98937382	1.225	1345.400936	1123.717442	939.6002404	12.51564548	1133.401949	1794.14388

Tab.1. Estimación del recurso eólico de la estación MMGL.

## Conclusiones

La extrapolación de datos de velocidad del viento, tomados a una altura de referencia, debe ser manejada cuidadosamente, puesto que al usar una sola ecuación o no tener bien identificados los parámetros existentes en el entorno del posible emplazamiento, puede dar como resultado estimaciones erróneas de la densidad de potencia del viento.

En la tabla 1 se aprecia que la densidad calculada con datos de presión y temperatura tiene una mejor estimación (se aproxima al valor promedio de densidad a presión atmosférica estándar) que cuando únicamente se tienen registros de presión y la elevación a la que se encuentra la estación meteorológica. Los valores de potencia disponible estimados mediante las diversas aproximaciones numéricas oscilan dentro de un rango similar bajo cierto margen de error.

Es recomendable hacer un análisis mensual y por estacional de los datos, esto con el fin de identificar los meses y las estaciones del año que cuenten con velocidades altas, aptas para un óptimo aprovechamiento. Las velocidades aprovechables son consideradas a partir de 4m/s.

Este análisis estadístico es un preliminar que se debe llevar a cabo antes de montar torres con aerogeneradores o instrumentos precisos, ya que un estudio de este tipo puede economizar tiempo y dinero invertido en la caracterización de una zona de interés.

Es importante señalar que la potencia eólica disponible del viento obtenida mediante el modelo, no será siempre aprovechada en su totalidad, esto debido a las pérdidas de energía que todo sistema puede presentar. Los modelos actuales que calculan el potencial eólico toman en cuenta el valor promedio de la densidad, por lo que subestiman la densidad de potencia del viento.

## Bibliografía

- 1) Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento, Bañuelos Rueda F, Ángeles Camacho C, Serrano García J.A, Muciño Morales D.E., Universidad Autónoma de México.
- 2) Atlas de recursos eólicos del estado de Oaxaca, Elliot M, Schwartz M, Scott G, Haymes, Heimiller D, George R. Laboratorio Nacional de Energía Renovable.
- 3) Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales, Marrero Santana María. Depto. Física Aplicada Universidad de Granada, Mayo 2011.
- 4) Evaluation of the eolic potential of a zone located in the state of Zacatecas Mexico, Fajardo Diaz Juan Luis, Garcia Gonzalez Juan Manuel, Garcia Saldivar Victor Manuel, Ciencias Químicas UAZ. 2010.