Variación del Viento y Energía Asociada

Programa	Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida
Acrónimo del proyecto	FAEyGD
Tipo (nivel de distribución)	Público con reservas de derecho de autor
Fecha de Entrega	27 Febrero, 2009
Reporte Numero	Eolo3-03
Estatus y Versión	Borrador. 1.00
Número de Páginas	13
Supervisor	Francisco M. González-Longatt
Autor(es)	Annamaría Jordán Machado Eduard Francisco M. González-Longatt

fgLongatt.org.ve

Tabla de Contenido

Contenido **Pág.**

Introducción 4
Variación espacial del viento 5
Variación temporal del viento 5
Variaciones de la velocidad del viento a largo Plazo 5
Variaciones de la velocidad del viento anuales y estaciones 6
Variaciones Sinópticas y Diurnales 7
Energía Contenida en el Viento 8
Densidad de Potencia Disponible en el Viento 8
Máxima Potencia Extraíble del Viento 9
Conclusiones 11
Referencias Documentales 12

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Índice de Figuras

Descripción **Pág.**

Figura 1. Función probabilidad de Weibull 7

Figura 2. Eficiencia del Rotor versus la relación V_0/V.....10

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Introducción

Los vientos son originados en gran proporción por la acción de la energía solar, que a través del calentamiento desigual de la tierra crea movimiento en las masas de aire. Existen variaciones de éstas masas de aires a largo plazo, anuales, estacionales, sinópticos y diurnales; cada una de estas variaciones son más complejas unas que las otras, pero todas dependientes de otras variables climáticas como lo son la presión y la temperatura, y además dependen de otras variables como la altura [1], [2].

La determinación de la variación de los vientos permite determinar cuáles son las regiones con mayor posibilidad de aprovechamiento del recurso eólico, siendo parte de este proceso conocer la cantidad de energía contenida en el viento y así poder evaluar este potencial.

En este reporte de investigación se presentan los factores considerados en la variación de los vientos, así como la manera de determinar la cantidad de energía, la densidad de esta energía por metro cuadrado y cual es la mayor cantidad de esta que puede ser extraída para su aprovechamiento.

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Variación espacial del viento

Los vientos son originados casi por completo por la energía solar, causando un calentamiento diferencial sobre la superficie de la tierra. Este calentamiento es más intenso en las masas de tierra cercanas al ecuador y el mayor calentamiento ocurre en las horas del día. El aire caliente asciende y circula en la atmósfera para regresar como aire frío a la superficie, este movimiento es influenciado por la fuerza coriolis debida a la rotación de la tierra [1], [2].

La no uniformidad en altura o desnivel que presenta la superficie de la tierra influencia de gran manera los patrones de circulación de las grandes masas de aire caliente del planeta. Estos interactúan de manera muy compleja lo que causa las dificultades a la hora de realizar los pronósticos climáticos diarios del tiempo en algunas localidades [1], [2]. Una de las características importantes de la variabilidad del viento, es que esta es tanto *espacial* como *temporal* [3].

Las *variaciones espaciales* son denominantes en tres escalas como los son la *macro-escala* que es de unos 1000 Km. En este tipo de variación a nivel macro el viento se ve una fuerte influencia en de las fuerzas de Coriolis, las fuerzas de presión y el roce del suelo, la *meso-escala* que es de 10 a 500 Km y corresponde por ejemplo a las brisas marinas o a los vientos asociados a cordilleras o valles. La *micro-escala* se refiere al tamaño de perturbaciones como colinas, montículos o hasta la misma estela de las turbinas [3].

Por ejemplo las localidades que presentan colinas o montañas permiten al aumento de la velocidad del viento, esto es particularmente un resultado de la altitud, lo que sugiere que en las zonas elevadas la movilidad de la energía es mayor, esto se debe en su mayoría a la aceleración del flujo del viento sobre y alrededor de esta topografía que actúan como un túnel natural por donde el flujo de viento circula en determinado momento. El efecto contrarios ocurre en las zonas de depresión del terreno como por ejemplo los valles, donde las montañas alrededor conforman un elemento que bloquea las corrientes de aire y no permite una buen desarrollo del potencial eólico [1], [2].

Los efectos térmicos pueden causar también resultados considerables en las variaciones locales. Las regiones costeras son un ejemplo claro de esto debido a que las tierra se enfría y se calienta mucho más rápido que el mar lo que origina brisas continuas durante las 24 horas del día, siendo estos sitios actos para las explotación de recurso eólico. Los efectos térmicos también se presentan por diferencia de altitud, donde conforme la altura aumenta la presión también lo hace y la temperatura disminuye lo que causa que la densidad volumétrica aumente y el viento contenga una mayor energía [1], [2].

Variación temporal del viento

La variación temporal del tiempo es algo sumamente complejo, sin embargo, en este documento, se van a tratar tres de ellas:

- Variaciones del viento a largo plazo
- Variaciones del viento anuales y estaciones.
- Variaciones sinópticas y diurnales.

Variaciones de la velocidad del viento a largo Plazo

Si se examina en un lugar fijo las medidas de velocidad del viento que provee un anemómetro, se observa que hay evidencias de que la velocidad del viento en una zona en particular puede tener una variación a largo plazo muy lenta. Claramente esto se asocia a las variaciones a largo plazo que presenta la temperatura de las que se tiene un amplio registro, en la actualidad se llevan a cabo debates sobre si el calentamiento global causado por el hombre afectará la aceleración del recurso eólico en las décadas venideras [1], [3].

También hay que considerar las variaciones de un año a otro que pueden ser causadas por cambios climáticos bruscos difíciles de predecir, como por ejemplo el fenómeno climático del Niño y las erupciones

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

volcánicas entre otras, estos agregan un grado de incertidumbre mayor que se tienen que tomar en cuenta a la hora de llevar a cabo la escogencia del sitio para el desarrollo de un proyecto eólico además de que estos causan una disminución en la vida útil de estas tecnologías [1], [2].

Variaciones de la velocidad del viento anuales y estaciones

Si bien año a año las variaciones anuales de las velocidades del viento resulta más difícil de predecir, estas variaciones de velocidad durante un año pueden ser bien caracterizadas en términos de una distribución de probabilidad. La *distribución de Weibull* fue utilizada para obtener una buena representación de las velocidades del viento. Esta distribución tiene la siguiente forma [1] :

$$F(U) = e^{\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right)} \tag{1}$$

donde $F(U)$ es la fracción de tiempo para el cual el promedio horario de la velocidad del viento exceda U. Este está caracterizado por dos factores, un factor de escala c y un factor de forma k que describen la variabilidad sobre el promedio. c está relacionado con el promedio anual de velocidad de viento $\overline{U}$ de la manera siguiente [1]:

$$\overline{U} = c\Gamma(1+1/k) \tag{2}$$

Donde Γ es la función gamma completa. Esta puede ser derivada considerando la función de densidad de probabilidad [1].

$$f(U) = \frac{dF(U)}{dU} = k\frac{U^{k-1}}{c^k}e^{\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right)} \tag{3}$$

Dado que el promedio de la velocidad del viento se obtiene por [1]:

$$\overline{U} = \int_0^\infty U f(U) dU \tag{4}$$

Una caso especial de la distribución de Weibull es la *distribución Rayleigh*, con $k=2$, que es actualmente un valor bastante típico en algunas localidades. Altos valores de k, como 2.5 o 3, es indicativo de que las variaciones horarias promedio de la velocidad del viento es pequeña comparada con la variación promedio anual, pero valores altos de k, como 1.5 o 1.2 indican gran variación sobre el promedio. Algunos ejemplos son mostrados en la Figura 1[1].

Si bien la distribución de Weibull obtiene una buena representación del régimen de viento de una región, este no es siempre el caso. Algunos sitios presentan grandes diferencias de viento entre el verano y el invierno, pero estos pueden ser representados bastante bien con una distribución de Weibull doble utilizando factores de escala y de forma distintos para las dos estaciones [1]. Por ejemplo:

$$F(U) = F_1 e^{\left(-\left(\frac{U}{c_1}\right)^{k_1}\right)} + (1-F_1)e^{\left(-\left(\frac{U}{c_2}\right)^{k_2}\right)} \tag{5}$$

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

www.fglongatt.org.ve

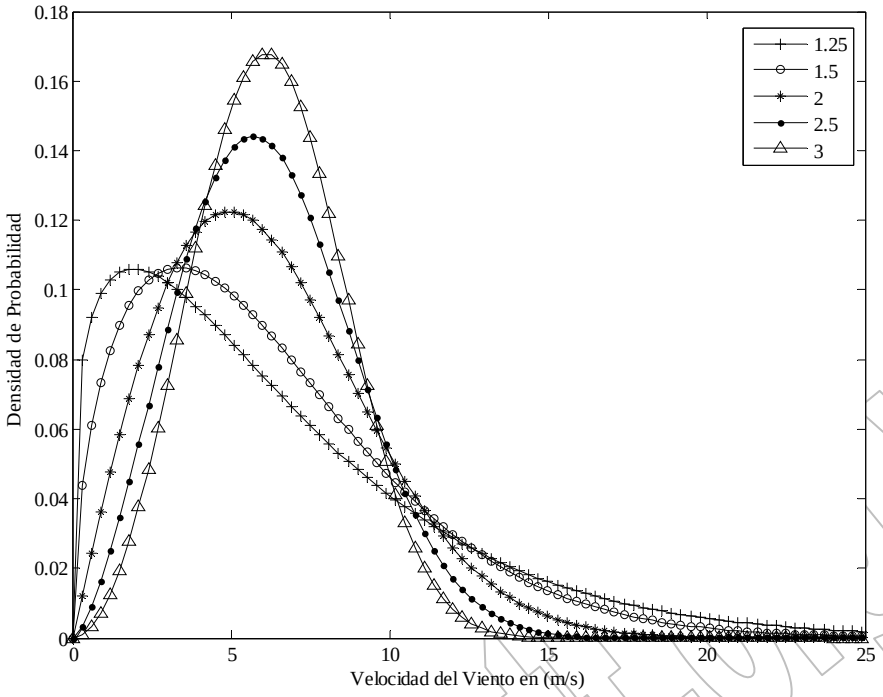

Figura 1. Función Probabilidad de Weibull para Distintos Valores de *k* [1]

Variaciones Sinópticas y Diurnales

En períodos de tiempos más corto las variaciones en las velocidades del viento suelen ser más aleatorias y menos predecibles. Sin embargo, estas variaciones presentan parámetros definidos, con frecuencia estas variaciones son de cerca de cuatro (4) días o más. Estas son las variaciones sinópticas que están asociadas con patrones de tiempo a gran escala tales como las zonas de altas y bajas presiones y esta también relacionada con fretes de tiempo ya que ellos se mueves a través de la superficie de la tierra [1].

Siguiendo el espectro de frecuencia a todavía frecuencias superiores, muchos lugares podían mostrar un claro piro diurnal, a una frecuencia de veinticuatro (24) horas. Este usualmente manejado por un efecto térmico local. Intensos calentamientos durante el día pueden causar importantes celdas de conducción, que amainan en la noche. Las brisas de de mar y tierra también contribuyen significativamente a el pico diurnal [1].

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Energía Contenida en el Viento

La energía cinética de una masa de aire *m* moviéndose con una velocidad *V* es obtenida de la siguiente relación: [4]

$$E_C = \frac{1}{2} m V^2 \tag{6}$$

El flujo de aire *M* se expresa como sigue a continuación: [2]

$$M = \rho A V \tag{7}$$

donde:

M: flujo de aire en (Kg/s).

ρ: densidad volumétrica del aire (Kg/m^3).

A: área de barrido de las palas del rotor (m^2).

V: velocidad del viento (m/s).

Derivando (6) con respecto el tiempo (*t*) se obtiene la potencia (P_C) debida a la energía cinética por la que la ecuación que describe el fenómeno queda de la siguiente manera [2]:

$$\frac{d(E_C)}{dt} = P_C = \frac{1}{2}\left(\frac{d(m)}{dt}\right)V^2 = \frac{1}{2} M V^2 \tag{8}$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la (8) la potencia cinética queda expresada de la siguiente manera: [4]

$$P_C = \frac{1}{2}(\rho A V)V^2 = \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{9}$$

Densidad de Potencia Disponible en el Viento

El recurso eólico en un sitio determinado pude ser determinado de manera precisa por la velocidad media del viento, pero la densidad de potencia disponible en el viento proporciona una indicación más correcta del potencial de energía eólica de un sitio.

La densidad de potencial disponible en el viento expresa la energía eólica contenida por metro cuadrado (W/m^2) [5].

La densidad de potencia disponible en el viento, se obtiene de la siguiente expresión [5]:

$$WPD = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n} \rho V_i^3 \tag{10}$$

Donde:

WPD: la densidad de potencia del viento en (W/m^2).

n: el número de de registros en el intervalo utilizado para el promedio.

ρ: la 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.

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

www.fglongatt.org.ve

Esta ecuación sólo debe ser utilizada para registros individuales de medición (por hora, cada diez (10) minutos, etc.) y no para los registros promedios a lo largo plazo tales como el valor mensual o anual [5].

La duración de la densidad del viento depende de la temperatura (*T*) y de la presión (*P*). Si se conoce la presión y la temperatura del sito, la densidad del viento puede ser calculada utilizado la siguiente expresión [5]:

$$\rho = \frac{P}{RT} \tag{11}$$

donde:

ρ: la densidad del viento en $\left(Kg/m^3\right)$.
P: la presión del aire $\left(N/m^2\right)$.
R: la constante especifica de gas del aire $\left(287\,J/Kg.K\right)$.
T: la temperatura del aire en grados Kelvin $\left(^{\circ}C + 273\right)$.

Si la presión del sitio no está disponible, la densidad del puede estimarse como una función de la elevación del sitio y la temperatura de la siguiente manera: [5]

$$\rho = \frac{P_0}{RT} e^{\left(\frac{-gz}{RT}\right)} \tag{12}$$

donde:

ρ: la densidad del viento en $\left(Kg/m^3\right)$.
P_0: la presión atmosférica estándar a nivel del mar $\left(101.325Pa\right)$.
g: la constante gravitacional $\left(9.8m/s^2\right)$.
z: la elevación del sitio sobre el nivel del mar $\left(m\right)$.

Máxima Potencia Extraíble del Viento

La potencia real que puede ser extraída de por las palas del rotor es la diferencia entre la energía río arriba y río abajo. Donde utilizando la ecuación (8) se tiene [4]:

$$P_C = \frac{1}{2} M\left(V^2 - V_0^2\right) \tag{13}$$

donde:

P_C: potencia mecánica extraída por el rotor.
V: velocidad del viento río arriba a la entrada de la palas del rotor.
V_0: velocidad del viento río abajo a la salida de las palas del rotor.

El flujo de aire a través de la palas girando es, por lo tanto; obtenido por la multiplicación de la densidad con la velocidad promedio, y queda de la siguiente manera: [4]

$$M = \rho A\left(\frac{V + V_0}{2}\right) \tag{14}$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la (13) se obtiene la potencia mecánica extraída por las palas del rotor que es conducida al generador eléctrico [4]:

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

www.fglongatt.org.ve

$$P_C = \frac{1}{2}\left[\rho A \frac{(V+V_0)}{2}\right]\left(V^2 - V_0^2\right) \tag{15}$$

Reordenado la expresión se obtiene:

$$P_C = \frac{1}{2}\rho A.V^3 C_p \tag{16}$$

Donde:

$$C_p = \frac{\left(1+\frac{V_0}{V}\right)\left[1-\left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2} \tag{17}$$

El C_p es la fracción de energía eólica río arriba, que es capturada por las palas del rotor. El factor C_p es llamado coeficiente de potencia o eficiencia del rotor [4].

Tal como se muestra en la Figura 2, donde se observa claramente que C_p solo puede tener un valor máximo para la función puede este depende la relación velocidades del viento aguas arriba y aguas abajo (V_0/V). [4]. Este máximo valor es de 0.59 cuando la relación (V_0/V) es 1/3. Entonces la máxima potencia extraída del viento, cuando la velocidad del viento río abajo es un 1/3 de la velocidad del viento río arriba es: [4]

$$P_{C\max} = 0.59\frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{18}$$

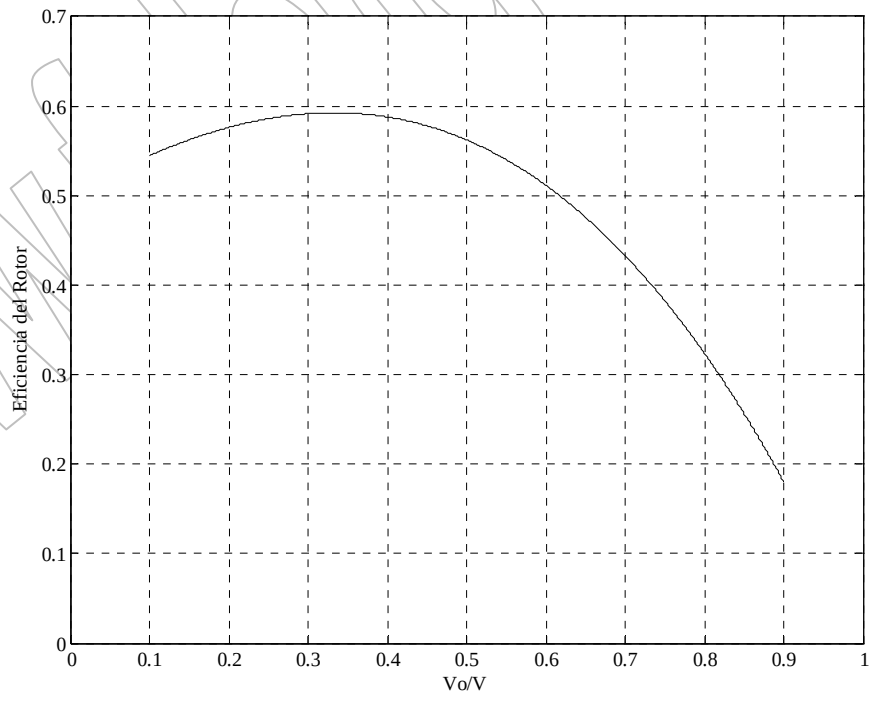

Figura 2. Eficiencia del Rotor versus la relación V_0/V. [3]

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Conclusiones

El viento es generado en casi su totalidad como una consecuencia de la energía solar. Estos presentan variaciones a los largo del tiempo que pueden ser divididas de acuerdo a su duración, por ejemplo, las variaciones a largo plazo que son influenciadas por los cambios climáticos y se presentan de manera lenta a lo largo de años, las variaciones anuales o estaciónales son más difíciles de predecir. Sin embargo, éstos pueden ser muy bien representados mediante una función de distribución probabilística en este caso la función Weibull, para las variaciones diurnales son muy difíciles de predecir pues sus cambios son mucho más bruscos.

Con la determinación de la variación del viento presente en la región o sitio donde se lleva a cabo un estudio eólico, es necesario determinar la cantidad de energía que este posee, dando como resultado que su contenido energético depende de la densidad del aire, de su velocidad y del área de barrido de las palas del rotor; pero para tener una mejor idea de este potencial se puede determinar la densidad de potencia que no es más que la potencia por metros cuadrados. Pero por más eficiente y mayor velocidad de los vientos que posea una región se mostró en este reporte que el limite teórico de la cantidad de energía que puede ser extraída idealmente es 59%.

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve

Referencias Documentales

[1] Burton T, Sharp D, Jenkins N, Bossany E. *"Wind Energy Handbook".* John Wiley & Sons, LTD. Chichester, England, 2001.

[2] Méndez R, Juan E. Villasana F, Rafael A. *"Análisis de Pre-Factibilidad Técnica-Comercial para el Desarrollo de una Granja de Viento en la Isla de Margarita, Venezuela".* Trabajo Especial de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Maracay, Venezuela, 2006.

[3] Amecedo R, J. Arnalte G, S. Burgos D, J. *"Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica"*. Editorial Rueda. Madrid. 2003.

[4] Mukund R. Patel. *"Wind and Solar Power System"*. CRC Press LLC. New York, 1999.

[5] Elliott D, Schwartz M, Scott G, Haymes S, Heimiller D, George R. *"Atlas de Recursos Eólicos del Estado Oaxaca".* Laboratorio Nacional de Energía Renovable, México, 2004. (On Line), disponible en: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADE742.pdf

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. http://www.fglongatt.org.ve