



TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

Análisis sobre la influencia de la turbulencia en la producción energética de las turbinas eólicas

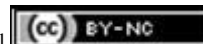
Analysis of the turbulence influence in the energy production of wind turbines

José Augusto Medrano Hernández ¹
Conrado Moreno Figueredo ¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba
Email: jmedrano@ceter.cujae.edu.cu

Recibido: mayo del 2018 Aprobado: septiembre del 2018

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN/ ABSTRACT

El presente trabajo surge a partir de la necesidad de desarrollar proyectos para la producción de electricidad. A partir de una campaña de mediciones y evaluación del recurso eólico en el litoral de Santa Cruz del Norte, donde se encuentra instalada la estación anemométrica "Caribe", donde la velocidad media del viento a 50m sobre el nivel del terreno es de 6,47m/s. Se analiza el comportamiento de la turbina eólica Goldwind S48/750, de la compañía china Goldwind, funcionando bajo las condiciones del viento del lugar tomado como sitio de estudio para un índice de turbulencia de 7%, obteniendo una nueva curva de potencia de la máquina funcionando bajo estas condiciones, pues la curva de potencia original está elaborada para un índice de turbulencia de un 10%. Finalmente, se cuantifica la diferencia entre estas potencias, demostrando la influencia de las características del sitio de instalación de la máquina en su funcionamiento.

Palabras clave: Índice de turbulencia; Producción de energía; Curva de potencia; Turbina eólica.

The present work arises from the need to develop projects for electricity production. From a measurements campaign and the wind resource assessment in the coast of Santa Cruz del Norte, where the anemometric station "Caribe" was installed, where the average wind speed at 50m above the earth is 6,47m/ s. The wind turbine Goldwind S48/750 behavior, from the chinese company Goldwind, is analyzed, working under the wind conditions of the place taken as a study place for a turbulence index of 7%, obtaining a new power curve of the machine operating under these conditions, since the original power curve is elaborated for a turbulence index of 10%. Finally, the difference between these powers is quantified, demonstrating the influence of the characteristics of the installation site of the machine in its operation.

Keywords: Turbulence index; Energy production; Power curve; Wind turbine.

INTRODUCCIÓN

Dada la creciente preocupación mundial por la degradación medioambiental por el empleo de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, surge la necesidad de encontrar soluciones energéticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Dentro de las posibilidades energéticas se encuentra la energía eólica, la cual ha resurgido como una de las alternativas más atractivas en la utilización de Fuentes Renovables de Energía.

En los últimos años, el interés en el estudio de un parámetro tan importante como la turbulencia atmosférica, el cual debe tenerse en cuenta para la selección de sitios de emplazamiento de máquinas eólicas, ha tenido un crecimiento extensivo, pues constituye una característica esencial que proporciona información sobre el comportamiento del viento en sí, influyendo finalmente en la producción energética de estas máquinas. Es importante destacar que una ligera variación en la velocidad del viento provocada por la turbulencia, genera una gran desviación en la potencia entregada por la máquina.

A partir de una revisión bibliográfica referida al tema, se puede afirmar que los modelos para el estudio del comportamiento de las máquinas que funcionan afectadas por la turbulencia que se encuentran con mayor frecuencia en la literatura son: el método de la renormalización, el cual considera que la velocidad del viento en un período de 10 minutos sigue una distribución de Gauss, descrita a través de la velocidad del viento, el conocido método de los intervalos, el cual puede estimar el cizallamiento a través de la velocidad equivalente [1], y con ello, la curva de potencia de la máquina, pero no tiene en cuenta el efecto de la turbulencia en el comportamiento de la máquina. También existen los modelos de Von Karman y el espectro de Kaimal. A continuación se caracterizan los cuatro artículos más relevantes.

Por ejemplo, en [2-4] los autores en sus trabajos para la modelación del comportamiento de la velocidad del viento teniendo la turbulencia, emplean el modelo de Kaimal, pues expresan que es uno de los modelos más efectivos que simula la velocidad del viento equivalente a la altura del buje de la máquina y que sólo depende de la velocidad de rotación de la turbina eólica.

En [5], los autores Gerardo Ahrtz y Daniel Fernández elaboran un modelo para la predicción del comportamiento de la velocidad del viento que experimenta una turbina eólica durante su funcionamiento a partir de la implementación del modelo de Von Karman. Comienzan analizando las componentes determinísticas de la velocidad del viento como por ejemplo, el perfil de viento con respecto a la altura y el efecto de la sombra de la torre.

En el estudio realizado a la literatura, se evidencia que los modelos para la predicción del comportamiento de la velocidad del viento cuando una turbina eólica funciona bajo los efectos de la turbulencia más empleados por los investigadores son el de Von Karman y el de Kaimal.

El modelo de “*Von Karman*” brinda una buena descripción para la turbulencia en túneles de viento, aunque el espectro de “*Kaimal*” puede dar una mejor observación empírica de la turbulencia atmosférica [6,7]. De los cuatro trabajos analizados, en tres de ellos, los autores emplean el modelo de Kaimal, lo cual evidencia lo anteriormente expresado.

Por lo expuesto anteriormente, a los efectos del presente artículo, se empleará el modelo de Kaimal para el estudio y predicción del comportamiento de una máquina eólica, tomando como ejemplo la turbina eólica Goldwind S48/750 funcionando bajo los efectos de la turbulencia atmosférica, para lo cual se ha tomado como caso de estudio, Santa Cruz del Norte, Cuba. Entre las principales razones por las cuales se eligió este sitio, se encuentra la necesidad de aumentar la generación de electricidad en el occidente del país, pues es donde se encuentran los mayores consumidores de electricidad, por otro lado, la capital se encuentra sólo a 40 Km de Santa Cruz del Norte, lo cual favorece a la reducción de las pérdidas en los conductos eléctricos.

En la década de los 2000 se realizó una campaña de mediciones de la velocidad del viento en el litoral de Santa Cruz del Norte, actual provincia Mayabeque, donde se instaló la estación anemométrica en el sitio conocido como “*Caribe*”, demostrándose que en el lugar existen valores de velocidad favorables para la generación de electricidad empleando la energía eólica. La velocidad media del viento observada es 6,47m/s a una altura de 50m sobre el nivel del terreno y el índice de turbulencia existente en el sitio es de un 7%, lo cual modifica la curva de potencia de la máquina, pues la curva original fue obtenida por el fabricante para un índice de turbulencia de 10%.

El objetivo principal del trabajo de observar y analizar las modificaciones que sufre la curva de potencia cuando la máquina opera bajo las características del viento en el sitio en estudio. A continuación se muestra la secuencia de trabajo para alcanzar este objetivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para analizar la influencia de la turbulencia en la producción energética de la turbina eólica Goldwind S48/750, se emplea como caso de estudio, la zona del litoral de Santa Cruz del Norte, donde se encuentra instalada la estación anemométrica “*Caribe*”.

Caracterización geográfica y del recurso eólico en la zona de estudio.

La estación “*Caribe*” se ubicó la zona del Rincón de Guanabo, a unos 0,5 km de la línea de costa en dirección norte y 1,75 km en la dirección este noreste (ENE). En el sitio no existen barreras significativas al viento dominante y la topografía es adecuada, por ser un terreno que tiene una pendiente muy suave al sur y suroeste que favorece la compresión de las líneas de presión y con ello la velocidad del viento en las direcciones NE, ENE y E que son los rumbos dominantes. Los rumbos dominantes: ENE (16,8 %), NE (14,9 %) y E (14,5 %) [8]. El índice de turbulencia promedio en el sitio de medición es 7%. [9]. Adicionalmente, las mediciones realizadas en el sitio, arrojaron que los factores de forma k y escala c promedios son 2,238 y 7,3 m/s respectivamente. [10]

Influencia de la turbulencia en un sitio.

La presencia de la turbulencia en una región, se manifiesta por bruscos cambios de dirección y velocidad del viento, así como los efectos térmicos que dan lugar a regímenes locales de vientos que se superponen a los eventos meteorológicos de gran escala sobre la región. Los terrenos complejos y las turbulencias locales pueden provocar ráfagas de viento que golpeen el rotor desde diversas direcciones y provoquen deformaciones permanentes y fracturas en estructuras y mecanismos de los aerogeneradores situados en pendientes rugosas.

La industria de la energía eólica cuantifica la turbulencia por la llamada *intensidad de la turbulencia* (I_u), [10-13], que no es más que la desviación típica de la velocidad horizontal dividida entre la velocidad media del viento en un período de tiempo típicamente de 10 minutos. Vea ecuación (1):

$$I_u = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}_z} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Donde σ es la desviación estándar en m/s y \bar{v}_z es la velocidad media del viento a la altura del buje de la máquina, también en m/s.

Si el viento fluctúa rápidamente, la intensidad de la turbulencia será mayor e inversamente, los vientos estables, tienen una menor intensidad de la turbulencia. La intensidad de turbulencia del viento cerca de la superficie terrestre normalmente se encuentra entre 0,1 – 0,4. En general, la más alta intensidad de turbulencia ocurre cerca de la superficie terrestre, donde el viento está en contacto directo con las rugosidades del terreno. Los valores típicos de la intensidad de la turbulencia medidos con anemómetros de copa se encuentran en el rango de 3 a 20%.

La curva de comportamiento de una máquina eólica, expresa la entrega de potencia en función de la velocidad del viento a la altura del buje y esto viene definido con un valor de la intensidad de la turbulencia. Si la intensidad de la turbulencia sobrepasa este valor, esta curva se verá disminuida en función de su forma y de la distribución de velocidades. La intensidad de la turbulencia, influye sobre el cizallamiento del viento y su perfil de velocidad por lo que influirá sobre la potencia entregada por la máquina.

Como se expresó anteriormente, para el desarrollo del artículo, se empleará el modelo de Kaimal, el cual consiste, como se muestra en la figura 1, en la distribución de velocidades del viento en el disco del rotor en una velocidad equivalente (V_{eq}), que aplicada de forma uniforme al disco a la altura del buje de la máquina, produce el mismo par que la velocidad media a la altura del buje. Vea ecuación (2):

$$T_i(\bar{V} + v(t, r, \varphi)) = T_i(V_{eq}(t)) \quad (2)$$

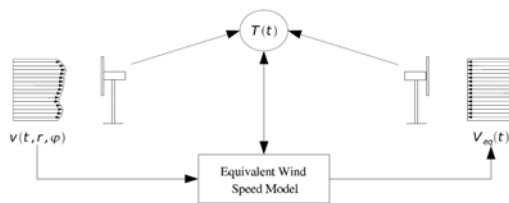


Fig. 1. Esquema de viento equivalente. Fuente: [13]

Adicionalmente, este modelo presenta la velocidad del viento equivalente (V_{eq}), representada como una secuencia de mediciones de la velocidad del viento, realizadas en determinados momentos y ordenados cronológicamente (conocido como serie temporal), la cual es convenientemente empleada como entrada a un modelo aerodinámico, simulando además, el efecto de la turbulencia que experimenta una máquina eólica durante su funcionamiento. [14].

Comportamiento dinámico de la turbina eólica operando bajo la influencia de las características del viento del sitio en función del índice de turbulencia existente.

Un modelo de viento es esencial para obtener simulaciones realistas de la potencia generada durante la operación continua de una máquina eólica. La velocidad del viento es de naturaleza aleatoriamente variable. Se encuentra regida por la superposición de los efectos micro y macro meteorológicos e influenciada por las particularidades del terreno circundante. Las variaciones lentas de velocidad se asocian a los regímenes meteorológicos globales y los cambios de mayor frecuencia se deben al efecto de turbulencias provocadas por obstáculos, tales como árboles, edificios, formaciones rocosas, entre otros. La turbulencia representa las variaciones estocásticas de la velocidad del viento alrededor de su valor medio, asumido constante en un intervalo de tiempo de hasta 10 minutos. [14]

La velocidad instantánea se puede expresar como: Vea ecuación (3)

$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(x, y, z) + g(x, y, z, t) \quad (3)$$

Solamente la componente longitudinal de la velocidad de viento (componente que coincide con la dirección de movimiento del viento) es tenida en cuenta, porque esta componente tiene una influencia dominante en las cargas aerodinámicas en las turbinas eólicas.

Modelo de turbulencia en un punto de referencia fijo ubicado a la altura del buje del aerogenerador.

El estudio de la composición frecuencial de la turbulencia del viento se realiza mediante el cálculo de la densidad espectral (S_u), la cual se obtiene a partir de la ecuación (4)

$$\frac{S_u(f)}{\sigma^2} = \frac{4 \cdot L_k / \bar{v}_z}{(1 + 6 \cdot f \cdot L_k / \bar{v}_z)^{5/3}} \quad (4)$$

$L_k = 5,67H_z$ (H_z es la altura del buje de la máquina. Si $H_z \leq 60m$)

$L_k = 340,2m$ si $H_z > 60m$

Donde f es la frecuencia para tres periodos de la rotación de la máquina (0,3 Hz) en Hz y $S_u(f)$ es la densidad espectral en función de la frecuencia [m^2/s^2].

La norma **IEC61400-1** presenta distintos modelos para la densidad espectral de la turbulencia longitudinal, entre ellos el espectro de “**Kaimal**”, que como se mencionó anteriormente, se empleará en el presente artículo.

La simulación de una serie temporal de turbulencia con espectro Kaimal se puede hacer utilizando una función de transferencia en el dominio de Laplace, de esta forma, aplicando la función de transferencia sobre ruido blanco (en MatLab, este bloque se conoce como The Band-Limited White Noise block, el cual genera números aleatorios normalmente distribuidos que son adecuados para su uso en sistemas continuos o híbridos, se obtiene el valor de la turbulencia en un punto ubicado a la altura del buje de un aerogenerador. La ecuación del espectro de “**Kaimal**” tiene la forma: Vea ecuación (5,6)

$$H_{KAIMAL}(S_u) = \sqrt{\frac{4L_k \sigma^2}{2v_z}} \cdot \frac{0,0182C^2 S_u^2 + 1,3653CS_u + 0,9846}{1,3463C^2 S_u^2 + 3,7593CS_u + 1} \quad (5) \quad \text{donde} \quad C = \frac{4L_k}{2\pi \bar{v}_z} \quad (6)$$

La ecuación 4, corresponde al espectro de “**Kaimal**”, es decir, representado un subconjunto espacial de un conjunto de valores de frecuencia parcialmente ordenado.

Obtención de la desviación estándar en función de la velocidad del viento.

La desviación estándar se obtiene en función del factor de forma k y la velocidad del viento (desde 1 hasta 25m/s), pero para ello, es necesario determinar el tipo de variabilidad de la velocidad del viento en el sitio caso de estudio, empleando los valores promedios de velocidad de viento y factor de forma. Esto puede realizarse a partir de la ecuación (7)

$$\frac{\sigma}{\bar{v}} = \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Donde Γ corresponde a la función Gamma evaluada en el factor k , la cual se puede aproximar a un polinomio que tiene la forma: Vea la ecuación (8):

$$C' = C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3X^3 + C_4X^4 \quad (8)$$

El polinomio anterior se puede escribir de la siguiente manera: Vea la ecuación (9):

$$\Gamma(1 + 2/k); \Gamma(1 + 1/k) = C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3X^3 + C_4X^4 \quad (9)$$

Donde $C_0 = 0,8863$; $C_1 = 0,00853$; $C_2 = 0,02558$; $C_3 = 0,002118$ y $C_4 = 6,0436 \cdot 10^{-4}$

Para el caso de la función Gamma evaluada $\Gamma(1 + 2/k)$, $X = 4(1 + 2/k) - 6$ y para $\Gamma(1 + 1/k)$, $X = 4(1 + 1/k) - 6$

Empleando los valores de velocidad de viento y factor de forma promedios en la ecuación 7, se obtiene que la relación $(\sigma / \bar{v}) = 0,494 \approx 0,5$, por lo que la variabilidad de la velocidad del viento en la zona clasifica como media, entonces el factor k se calcula aplicando el método de la variabilidad. En este caso: Vea ecuación (10):

$$k = 0,94\sqrt{\bar{v}} \quad (10)$$

Luego, despejando de la ecuación 6, se puede obtener el valor de la desviación estándar para cada valor de velocidad de viento.

Modelo de turbulencia en un punto de referencia giratorio localizado a la altura del buje de la máquina

La turbulencia experimentada por una pala de una turbina eólica que se encuentra girando, es distinta a la turbulencia que observaría un anemómetro situado en una torre meteorológica no afectada por la turbina.

La rotación de una pala en un campo velocidad de viento modifica el espectro turbulento provocando una redistribución de frecuencias y dando lugar a la aparición en el espectro, de componentes de energía centradas en la frecuencia de giro del rotor **1p** (un período) y en sus múltiplos. [14] En la literatura, a este fenómeno se le conoce **“muestreo rotacional”**.

La función de densidad espectral (función matemática que informa sobre cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de dicha señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada), correspondiente a la medida de una serie de tiempo de potencia activa producida por una turbina, muestra que las principales variaciones se tienen en las frecuencias **0 y 3p** (tres períodos de la rotación de la máquina o frecuencia 0,3 Hz). El efecto **3p** debido al muestreo rotacional de la turbulencia, suministra la principal contribución a la emisión de parpadeo (flicker).

La velocidad equivalente del viento ($v_{eq}(t)$) tiene la siguiente ecuación (11), matemática : [3,15]

$$v_{eq}(t) = \bar{v}_z + \bar{v}_z(t) + r_{v3}(t) \cdot \cos(3\omega_R \cdot t_1) + I_u(t) \cdot \text{sen}(3\omega_R \cdot t_2) \quad (11)$$

Donde \bar{v}_z – velocidad media del viento a la altura del buje de la turbina eólica, r_v – velocidad de una racha de viento para cuando la frecuencia es de 3 períodos (3p o 0,3Hz), I_u – intensidad de la turbulencia, ω_R – frecuencia angular del rotor de la turbina eólica (en este caso, 22,55 rad/s), t_1 es el tiempo de duración de una racha de viento (según literaturas estudiadas, es de 14s y t_2 es el intervalo de tiempo entre las mediciones de la velocidad del viento (10 min o 600 segundos). Este modelo depende de la posición ($\omega_R t$) del rotor. Por lo tanto, es válido tanto para turbinas eólicas de velocidad fija como variable.

Por otro lado, La función $\bar{v}_z(t)$ se obtiene aplicando un ruido blanco sobre la función de transferencia de **“Kaimal”**, seguida de la función de transferencia: Vea ecuación (12) y (13):

$$H(0, f) = \frac{4,7869d_{TF}S_u + 0,9904}{7,6823d_{TF}^2S_u^2 + 7,351d_{TF}S_u + 1} \quad (12) \quad \text{donde} \quad d_{TF} = \frac{R}{\bar{v}_z} \quad (13)$$

Donde R es el radio del rotor de la turbina y \bar{v}_z la velocidad media del viento a la altura del buje.

Estructura del modelo

La solución de este modelo puede obtenerse empleando softwares como Matlab. Para los efectos de este artículo, para la solución del modelo se emplea el software Matlab. El modelo implementado en Matlab, tiene la siguiente estructura: Vea figura 2

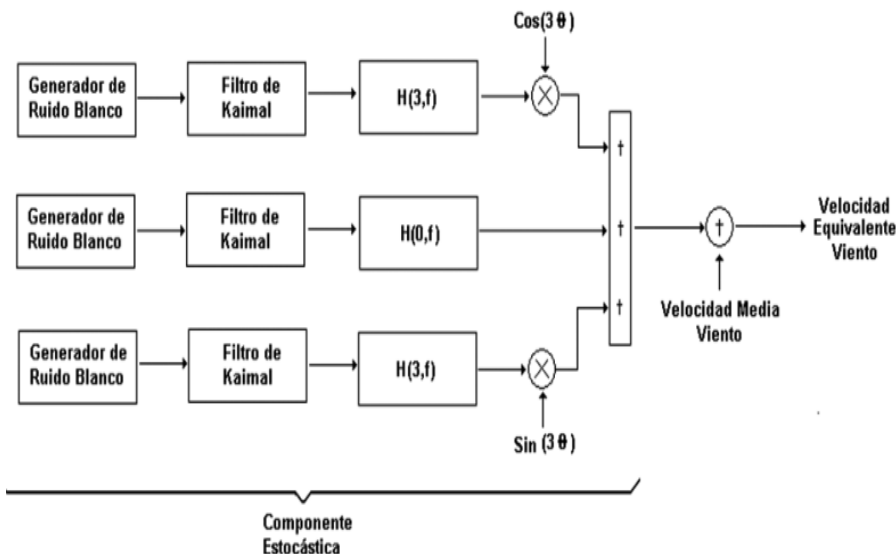


Fig. 2. Diagrama de bloque del modelo equivalente de la velocidad del viento implementado en Matlab. Fuente: [3]

La función de transferencia $H(3, f)$, tiene la siguiente forma: Vea ecuación (14):

$$H(3, f) = \frac{0,276669d_{TF}S_u + 0,0307}{0,3691d_{TF}^2S_u^2 + 1,7722d_{TF}S_u + 1} \quad (14)$$

Características generales de la turbina eólica en estudio: Turbina eólica Goldwind S48/750.

Goldwind 48/750 adoptó el concepto danés de turbinas de eje horizontal con un rotor de ceñida de tres palas cuyas palas están unidas rígidamente al cubo. El rotor funciona a velocidad constante y acciona un generador de inducción conectado a la red. Y es uno de los principios de diseño relativamente simple, confiable y robusto en el mundo. El eje principal y el multiplicador están separados, este diseño es muy simple, el peso es más ligero y de fácil mantenimiento. [15]

La curva de potencia

La curva de potencia de la máquina Goldwind S48/750 se muestra en la figura 3.

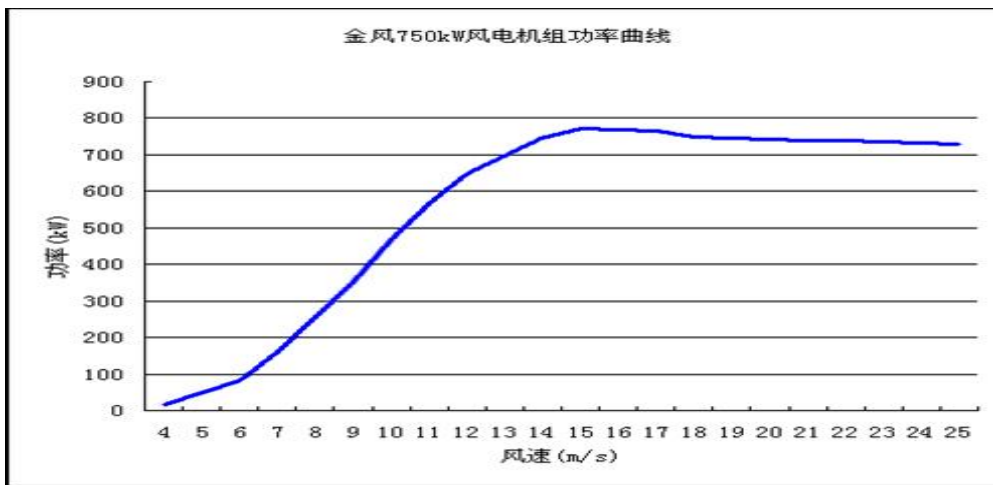


Fig. 3. Curva de potencia del aerogenerador Goldwind S48/750 para una densidad del aire igual a 1,225 [Kg/m³] e índice de turbulencia $I_u = 10\%$. Fuente: [15]

Metodología para la obtención de la curva de potencia de una turbina eólica para un índice de turbulencia diferente al especificado por el fabricante

La turbulencia es un fenómeno que influye sobre la entrega de potencia de una máquina eólica, modificando su curva de potencia.

Usualmente, para la obtención de la curva de potencia de las turbinas eólicas, los fabricantes emplean un índice de turbulencia de 10%.

El procedimiento para obtener la curva de potencia con la velocidad equivalente a partir del modelo de “*Kaimal*” sigue los siguientes pasos:

- a) Obtener la velocidad del viento que actúa directamente sobre las palas del aerogenerador. Cálculo de la velocidad equivalente a partir de las ecuaciones (4,5, 6,11,12,13 y 14).
 - a1) Determinar el tipo de variabilidad empleando la ecuación (7) y en función del factor de forma y velocidad de viento promedios.
 - a2) Calcular el factor de forma k aplicando el método de la variabilidad de la velocidad del viento ecuación (10)
 - a3) Cálculo de la función Gamma evaluada en el factor de forma aplicando las ecuaciones (8) y (9).
 - a4) Cálculo de la desviación estándar en función de la velocidad del viento y factor de forma, despejando de la ecuación (6).
- b) Obtener la potencia entregada por la máquina en función de la velocidad equivalente.
- c) Trazado de la nueva curva de potencia mediante el ploteo de puntos, o empleando Microsoft Excel.

Predicción de la producción de energía de las turbinas eólicas

Para la estimación de la producción de energía de la turbina eólica, se emplea el método de la curva de potencia. Vea ecuación (15).

$$E = \Delta t \sum P_i \cdot f_i \quad (15)$$

Donde P_i es la potencia que entrega la máquina en función de la velocidad del viento e índice de turbulencia y f_i es la frecuencia para la cual es probable que exista cierto valor de velocidad v_i y Δt es el tiempo que se analiza en horas.

Predicción de la producción de energía de las turbinas eólicas a índices de turbulencia diferentes a las del fabricante. Caso Santa Cruz del Norte

Como la distribución de velocidades del viento no es uniforme, para tener una mejor cuantificación de la potencia que entrega la turbina eólica, se emplea la ecuación (15).

Frecuencia con la cual ocurre cierto valor de velocidad de viento en un sitio (f_i)

La frecuencia f_i para la cual es probable que exista cierto valor de velocidad v_i , es una combinación entre el tiempo que se analiza y la distribución de probabilidad de la velocidad del viento $p(v)$. Vea la ecuación (16).

$$f_i = \Delta t \cdot p(v) \quad (16)$$

Las distribuciones analíticas de la velocidad del viento

Para realizar una adecuada selección de las turbinas eólicas que se deben instalar, es necesario una evaluación profunda del potencial eólico disponible en el sitio de emplazamiento, al no disponer del histograma de frecuencias de la velocidad del viento, se hace necesario el ajuste de distribuciones analíticas conocidas como por ejemplo, la distribución de Weibull (función de distribución de probabilidades) y la distribución de Rayleigh. Estas por su similitud al histograma de frecuencias, son las más empleadas.

Distribución de Weibull.

Desde el punto de vista práctico la expresión de Weibull, proporciona un método estadístico preciso para la representación de la distribución de velocidades del viento.

Permite además la evaluación de varias magnitudes importantes que caracterizan las propiedades del viento en función del factor de forma k y el factor de escala c .

La probabilidad de ocurrencia de cierto valor de velocidad de viento v_i $p(v)$ a través de la expresión de la distribución de probabilidad de Weibull tiene la forma. Vea ecuación (17):

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (17)$$

Distribución de Rayleigh.

La distribución de Rayleigh es un caso particular de Weibull con $k = 2$.

Factor de capacidad

Un indicador que brinda una muestra de cuanto se aprovecha a lo largo del período considerado la potencia instalada de acuerdo con las características del viento en el sitio y de la máquina, es a través del factor de capacidad, que generalmente se considera bueno para este tipo de instalaciones a partir del 20%. El factor de capacidad se calcula como se muestra en la ecuación (18):

$$F_c = \left(\frac{E}{T \cdot P_n}\right) \cdot 100\% \quad (18)$$

Donde E es la energía producida por la máquina, T es el tiempo que se analiza (en este caso, 8760 h/año) y P_n es la potencia nominal de la máquina (750 kW).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el caso del sitio donde se encuentra instalada la estación meteorológica “Caribe” en el litoral de Santa Cruz del Norte, la velocidad media del viento a 50m sobre el nivel del terreno es de 6,47 m/s.

En la tabla 1, se muestran los valores de los factores de forma (k) y escala (c) promedios para una altura de 50m sobre el nivel del terreno. En la figura 4, se muestra las distribuciones de probabilidad de Weibull.

Tabla 1 Parámetros de la distribución de probabilidad en el sitio de estudio.

| Altura (m) | Factor de forma (k) | Factor de escala c (m/s) |
|------------|---------------------|--------------------------|
| 50 | 2,238 | 7,3 |

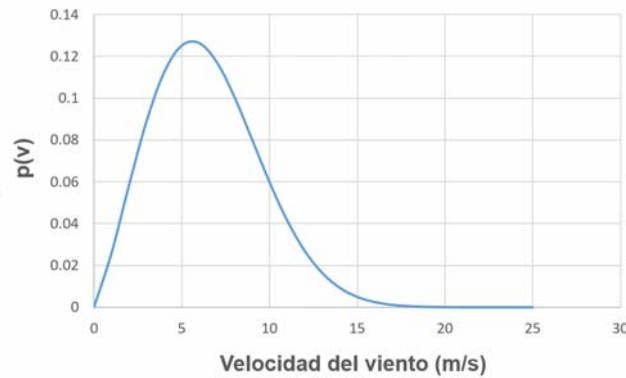


Fig. 4. Distribución de probabilidad de Weibull para el sitio caso de estudio ($k=2,238$ y $c=7,3$ m/s). Fuente: Propia

Predicción de la producción energética de las turbinas eólicas en las condiciones de Santa Cruz del Norte

La producción de energía de las turbinas eólicas, se obtiene a partir de la ecuación (14), en combinación con la ecuación (16) o figura 4.

Potencia entregada.

Aplicando la metodología antes explicada, en la tabla 2, se muestran los resultados de los parámetros de la curva de potencia de la máquina para los índices de turbulencia de 7 y 10% respectivamente. Los resultados fueron obtenidos a partir de la aplicación de las ecuaciones (4 -10).

Tabla 2 Resultados de la obtención de las curvas de potencia entregada por el aerogenerador para índices de turbulencia de 7 y 10% respectivamente.

| $I_u=10\%$ | | $I_u=7\%$ | |
|----------------------------|--|----------------------------------|--|
| Velocidad del viento (m/s) | Potencia entregada por la máquina (kW) | Velocidad equivalente Veq. (m/s) | Potencia entregada por la máquina (kW) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 2,052 | 0 |
| 2 | 0 | 3,052 | 0 |
| 3 | 0 | 4,052 | 18,627 |
| 4 | 17 | 5,052 | 49,53 |
| 5 | 48 | 6,052 | 83,989 |
| 6 | 81 | 7,052 | 166,624 |
| 7 | 160 | 8,052 | 262,805 |

Las curvas de potencia de la máquina para los índices de turbulencia de 10 y 7%, se pueden observar gráficamente en la figura5:

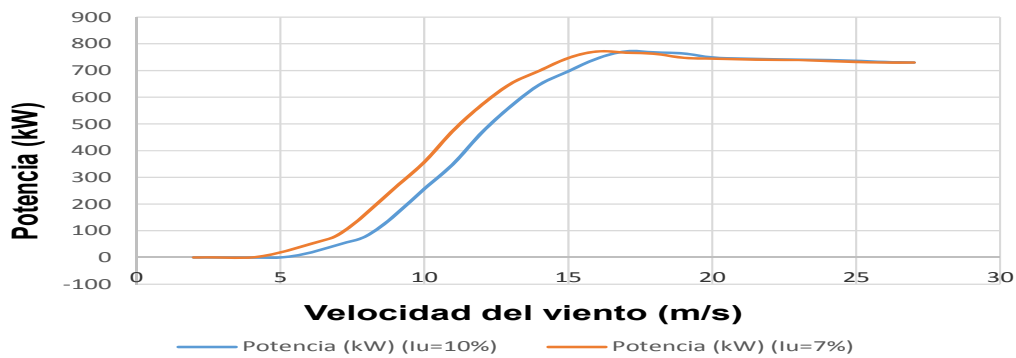


Fig. 5. Curvas de potencia del aerogenerador Goldwind S48/750 para índices de turbulencia de 7 y 10%. Fuente: Propia

Como se observa en la figura 5, la potencia entregada sufre un incremento debido a las condiciones favorables del viento en el sitio de estudio al tener un índice de turbulencia bajo (sólo 7%) menor que el 10% con el que se construyeron las curvas de potencia del aerogenerador analizado.

Los resultados de la producción de energía del aerogenerador y factor de capacidad para los índices de turbulencia de 7 y 10%, se muestran en las tablas 3 y 4:

Tabla 3. Producción energética en kWh/año de las turbinas eólicas para un índice de turbulencia del fabricante (10%).

| Altura de instalación de la máquina (m) | Energía producida (kWh/año) | Factor de capacidad (%) |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| 50 | 1626800,106 | 24,8 |

Tabla 4. Producción energética en kWh/año de las turbinas eólicas para un índice de turbulencia de 7%

| Altura de instalación de la máquina (m) | Energía producida (kWh/año) | Factor de capacidad (%) |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| 50 | 2195667,063 | 33,4 |

Como se observa en las tablas 3 y 4, la producción de energía de la turbina eólica se incrementa en un 34,7%. Esto se debe a las condiciones del viento favorables en el sitio de estudio al tener un índice de turbulencia bajo (sólo 7%), incrementándose la entrega de potencia por parte de la máquina y por ende, un incremento en el factor de capacidad, el cual se considera bueno a partir del 20%.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el estudio de la influencia de la turbulencia a partir del modelo de Kaimal y su influencia en el comportamiento de una máquina eólica, tomando como ejemplo la turbina eólica Goldwind S48/750 operando en Santa Cruz del Norte en dos condiciones; para un índice de turbulencia del 10%, para el cual el fabricante de la máquina obtuvo la curva de potencia y un índice de turbulencia de 7%, inferior al de prueba de la máquina, de lo cual se concluye lo siguiente:

1. El efecto de la turbulencia en un sitio modifica los parámetros de funcionamiento de cualquier máquina eólica. Al operar la máquina en un sitio con un índice de turbulencia bajo (inferior al cual el fabricante obtuvo la curva de potencia) como es el caso de Santa Cruz del Norte, la curva de potencia del aerogenerador se modifica y con ello, la entrega de potencia sufre un incremento, al igual que la producción de la energía y viceversa, si aumenta el índice de turbulencia.
 2. En este caso de estudio, esta máquina operando bajo las características del viento del lugar, ha logrado un incremento en su producción energética en un 35%, algo muy favorable y un incremento del factor de capacidad igual en un 34,7%, lo cual implica en la mejora de la eficiencia.
- Por lo antes expuesto, se puede afirmar que la turbulencia tiene gran influencia en la producción de energía de una turbina eólica, para los efectos del presente trabajo, esta influencia es favorable, obteniéndose una mayor producción energética.

REFERENCIAS

- [1] Lundquist, J., Clifton A., "How turbulence can impact power performance", September 2012, North American Windpower.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <https://www.wind-watch.org/documents/how-turbulence-can-impact-power-performance/>
- [2] G. R. Calzolari y C. R. Saldaña, "Modelado de una turbina eólica de velocidad fija con ATP". p.59. [Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/321119366/pp59>
- [3] V. M. Salcán Gabriela, Urquizo Javier, "Modelado de una turbina eólica de velocidad variable con control de ángulo de calaje", 2013. [Consultado mayo de 2017]. Disponible en: http://www.academia.edu/6671939/MODELADO_DE_UNA_TURBINA_E%C3%93LICA_DE_VELOCIDAD_VARIABLE_CON_CONTROL_DE_%C3%81NGULO_DE_CALAJE
- [4] V. T. H. R. González Acevedo H., "Control de una turbina eólica de velocidad variable conectada a la red eléctrica," Junio 2008.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/284691370_Control_De_Una_Turbina_Eolica_De_Velocidad_Variable_Conectada_A_La_Red_Electrica
- [5] M. A. Ahrtz Gerardo, Fernández Daniel "Modelizado y simulación del viento efectivo experimentado en turbinas eólicas," 2013.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <http://estrucplan.com.ar/articulos/modelizado-y-simulacion-del-viento-efectivo-experimentado-en-turbinas-eolicas/>
- [6] P. P. D. Uscátegui Cristancho Omar Geovanny, "Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas", 2013.p.135.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <https://vdocuments.mx/modelado-y-simulacion-de-un-generador-eolico.html>
- [7] G. Amaya, R. Omar, Cooz U., Marco A., Durán M., Luis R., "Modelado del viento para Simulaciones Computarizadas de Sistemas de Potencia", 2007, reporte de investigación.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: http://www.academia.edu/15289277/Modelado_del_Viento_para_Simulaciones_Computarizadas_de_Sistemas_de_Potencia
- [8] Shahid I, *et al.*, "Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden: A GIS-based approach", Elsevier, Energy, April 2015, Volume 83, p. 447-461.[Consultado mayo 2017]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215001991>.
- [9] Roque Rodríguez A. y otros, "Caracterización físico-meteorológica de las capas bajas de la atmósfera a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente y su aplicación al estudio del viento como fuente de energía", 2010 [consultado mayo de 2017]. Disponible en: meteorologica-de-las-capas-bajas-de-la-atmosfera-a-partir-de-la-implementacion-de-una-red-de-torres-altas-de-gradiente-y-su-aplicacion-al-estudio-del-viento-como-fuente-de-energ
- [10] Rodríguez C. A., "Caracterización y evaluación del potencial eólico del litoral oeste de Santa Cruz del Norte con fines energéticos", Tutor: Conrado Moreno Figueredo, Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de la Habana (Cujae), 2017.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Maestria.pdf>
- [11] Clifton A.; Wagner R. (2014). "Accounting for the effect of turbulence on wind turbine power curves". The Science of Making Torque Proceedings; June 18-20, 2014. Copenhagen. Denmark. [Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62234.pdf>
- [12] Clifton, A, *et al.*, "Using machine learning to predict wind turbine power output". Environmental Research Letters, 2013. Consultado mayo de 2017. Disponible en : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/024009/meta>
- [13] Viguera A., "Modelado de la fluctuación de potencia en grandes parques eólicos marítimos", Cartagena, 2008. Tesis doctoral.[Consultado mayo de 2017] Disponible en: https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/TesisDoctoral_2008_AntonioViguera.pdf
- [14] Vásquez Guerrero, W. A "Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado utilizando Matlab", proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero eléctrico, Quito, Ecuador, 2014.[Consultado mayo de 2017]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/1245564/cd-5454.pdf>.
- [15] Parámetros técnicos del aerogenerador Goldwind S48/750, 2006,[Consultado mayo 2017]. Disponible en: <http://docplayer.net/48548088-Goldwind-s48-750-50Hz-technical-specifications.html>