

Modelación y simulación de la velocidad de viento por medio de una formulación estocástica

Francisco M. González-Longatt⁽¹⁾, Omar Amaya⁽¹⁾, Marco Cooz⁽¹⁾, Luis Duran⁽¹⁾
César Peraza⁽²⁾, Francisco J. Arteaga⁽³⁾, Carlos Villanueva⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional
Maracay, Venezuela

⁽²⁾ Instituto Tecnológico de Valencia IUTVAL, Valencia, Venezuela

⁽³⁾ Centro de Investigación y Tecnología en Automatización, Electrónica y Control CITAE

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Email: fglongatt@ieee.org, marcocooz@gmail.com, luisr-durandm@hotmail.com,

cperaza@cantv.net, farteaga@uc.edu.ve

Resumen

Este artículo presenta un modelo estocástico para la simulación del comportamiento de la velocidad del viento en dirección horizontal. Además, se desarrollan modelos tanto para grandes como pequeñas escalas de tiempo. Estos modelos se obtienen a partir de una investigación documental en la literatura especializada. En el modelo a pequeñas escalas de tiempo se consideran cuatro componentes: promedio, rama, ráfaga, y turbulencia. El comportamiento de la componente turbulencia en la velocidad del viento fue modelado incluyendo una variable aleatoria. También se muestra el modelo para grandes escalas de tiempo, a partir de ciertas consideraciones para el modelo de pequeñas escalas de tiempo. Se presenta una discusión sobre la intensidad de la turbulencia y la longitud de escala de los fenómenos. Finalmente, el modelo fue validado mediante simulación en Matlab de un caso bien documentado.

Palabras clave: Velocidad del viento, intensidad de turbulencia, modelo estocástico.

Modeling and simulation of wind speed using a stochastic formulation

Abstract

This article presents a stochastic model to simulate the behaviour of the wind speed in a horizontal direction. In addition, models are developed for both large and small scales of time. These models are obtained from a documentary research in the specialist literature. In the model for small time scales four components are considered: average, ramp, gust, and turbulence. The behavior of wind speed turbulence component was modeled including a random variable. The large time scale model is also shown. Such model is derived from certain considerations on the short time scale model. A discussion on turbulence intensity and phenomena length scales is presented. Finally, the model was validated through simulation in Matlab from a well documented case.

Keywords: Wind speed, intensity of turbulence, stochastic model.

1. INTRODUCCIÓN

En la evaluación del desempeño de un sistema eólico es sumamente importante conocer el comportamiento de la velocidad del viento [1]. Principalmente, el viento se origina por el calentamiento no uniforme que sufre la tierra; pero, además, a escalas suficientemente grandes de altura. El viento resulta fundamentalmente de un equilibrio entre la Fuerza de Coriolis,

la Fuerza de Presión y el Rozamiento con el suelo. En zonas próximas a la superficie del suelo, el rozamiento con el terreno adquiere más importancia y la dirección de la velocidad posee una componente en la dirección de mayor a menor presión. Por otro lado, a una escala local más pequeña (micro-escala), puede haber muchos otros factores que influyen considerablemente en el viento. Uno de los más importantes son los obstáculos y configuraciones orográficas, que dan lugar a

efectos aceleradores, por ejemplo, en las colinas, que son de mayor interés para el aprovechamiento de la energía eólica [2]. En ausencia de un registro secuencial de velocidades del viento, cantidad y calidad, es posible hacer uso de las características estadísticas de los datos para calibrar modelos estocásticos y entonces generar una serie de tiempo de velocidad. En este artículo se presenta inicialmente un modelo estocástico para la velocidad del viento, y posteriormente se muestran los resultados obtenidos de una simulación para producir una serie de tiempo de velocidad de viento adecuada para evaluar el desempeño de los sistemas eólicos.

2. MODELO DEL VIENTO

Para la modelación del viento, resulta conveniente distinguir dos grandes escalas de tiempo: pequeñas escalas de tiempo donde se consideran los fenómenos dominantes en un período del orden de los segundos, y grandes escalas de tiempo que van desde minutos, horas e inclusive días. La modelación en cada escala de tiempo, es diferente. En este artículo se ha considerado la modelación de la velocidad del viento en ambas escalas de tiempo, pero en una sola dirección (horizontal).

3. MODELO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A PEQUEÑA ESCALA

Un modelo estocástico adecuado, para la velocidad del viento a pequeña escala, asume que en cada instante de tiempo, la velocidad del viento $v_w(t)$ está constituida por la suma de cuatro componentes, como se muestra [3, 4]:

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (1)$$

siendo: v_{wa} : valor promedio, $v_{wr}(t)$: componente rampa, para representar un incremento continuo en la velocidad del viento, $v_{wg}(t)$: componente de ráfaga, representando una ráfaga en el viento, y $v_{wt}(t)$: componente que representa la turbulencia.

3.1. Componente de velocidad promedio

El valor promedio de la velocidad del viento v_{wa} , corresponde al promedio aritmético de la velocidad del viento registrada durante un cierto período de tiempo considerado. Por lo general, esta información es fácilmente extraíble de una serie de datos de velo-

cidad del viento, mediante un simple tratamiento estadístico.

3.2. Componente rampa de la velocidad del viento

La componente de rampa se emplea para la simulación de cambios en la velocidad de viento, cuyo comportamiento puede ser simulado en una forma más o menos lineal (ascenso o descenso).

Esta rampa en la velocidad del viento es caracterizada por tres parámetros: la amplitud de la rampa, $\hat{A}_r$ (m/s), el tiempo de comienzo o inicio de la rampa T_{sr} (en seg.), y el tiempo final de la rampa, T_{er} (en seg.). La formulación matemática de la componente de rampa de la velocidad del viento se describe en las siguientes ecuaciones [3]:

$$\begin{aligned} t < T_{sr} & \quad \text{para} & \quad v_{wr} = 0 \\ T_{sr} \leq t \leq T_{er} & \quad \text{para} & \quad v_{wr} = \hat{A}_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \\ T_{er} < t & \quad \text{para} & \quad v_{wr} = \hat{A}_r \end{aligned} \quad (2)$$

3.3. Componente de ráfaga de la velocidad del viento

Las ráfagas son fluctuaciones rápidas en la velocidad del viento, con cierta variación entre los picos y la parte estable de la curva, es decir un cambio temporal en la velocidad del viento [4].

La ráfaga está caracterizada por tres parámetros: la amplitud, $\hat{A}_g$ (m/s), el tiempo de comienzo o inicio T_{sg} (en seg.), y el tiempo final T_{eg} (en seg.). La formulación matemática de la componente de ráfaga de la velocidad del viento se describe en las siguientes ecuaciones [4]:

$$\begin{aligned} t < T_{sg} & \quad \text{para} & \quad v_{wg} = 0 \\ T_{sg} \leq t \leq T_{eg} & \quad \text{para} & \quad v_{wg} = \hat{A}_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}} \right) \right] \right\} \\ T_{eg} < t & \quad \text{para} & \quad v_{wg} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3.4. Componente de turbulencia de la velocidad del viento

La turbulencia del viento es una función sumamente compleja, debido a que ella involucra un comportamiento errático y poco predecible de la velocidad

del viento, lo que dificulta la simulación matemática de esta componente. El comportamiento de la turbulencia, depende de varios factores como son: origen de la turbulencia, intensidad y espectro. Los entendidos en la simulación de la turbulencia del viento [3-5], por años han estudiado el fenómeno, y han encontrado que posee distintos enfoques para la simulación, definidos en función del fenómeno a estudiar y el lugar donde se esté llevando a cabo el estudio. Una forma de realizar el modelado de la turbulencia es considerando tres aspectos: la intensidad de la turbulencia, el espectro de turbulencia y las escalas de longitud.

3.4.1. Intensidad de turbulencia

La intensidad de turbulencia en la atmósfera neutral claramente depende de la rugosidad de la superficie z_0 . Para la componente longitudinal I_u , la desviación estándar es σ_u , y es aproximadamente constante con la altura h , ya que la intensidad de turbulencia disminuye con la altura. Precisamente, la relación $\sigma_u = 2.5u^*$ puede ser usada para calcular la desviación estándar en función de la velocidad de fricción u^* . El más reciente trabajo de Engineering Sciences Data Unit (ESDU) [6], hace pensar en una variación dada por [5]:

$$\sigma_u = \frac{7.5\eta \left(0.538 + 0.09 \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right) p u^*}{1 + 0.156 \ln \left(\frac{u^*}{f z_0} \right)} \quad (4)$$

siendo: $\eta = 1 - \frac{6fh}{u^*}$ $p = \eta^{16}$
 $f =$ parámetro de Coriolis

Esto aproxima a $\sigma_u = 2.5u^*$ cerca de la tierra, pero de grandes valores a mayores alturas. La intensidad de turbulencia longitudinal es:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (5)$$

$\bar{U}$ = velocidad promedio del viento

La intensidad lateral (I_v) y vertical (I_w) de turbulencia son dadas (ESDU) [6]:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{U} = I_u \left(1 - 0.22 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2z} \right) \right) \quad (6)$$

$$I_w = \frac{\sigma_w}{U} = I_u \left(1 - 0.45 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2z} \right) \right)$$

Donde z es la altura de la atmósfera sobre la capa límite.

Intensidad de turbulencia normalizada. A fin de homologar criterios en el cálculo de la intensidad de la turbulencia, algunos cuerpos de normalización han decidido adoptar metodologías estandarizadas para homologar los cálculos en el diseño, construcción y evaluación del desempeño de turbinas de viento. The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers en 1992 estableció un código para la práctica de las cargas y la seguridad en la construcción de las turbinas de viento [7]. Este código es reconocido como el Danish Standard (DS) DS472, 1992 y especifica la intensidad de turbulencia en todas las direcciones:

$$I_u = \frac{1}{\ln \left(\frac{h}{z_0} \right)} \quad \begin{aligned} I_v &= 0.8I_u \\ I_w &= 0.5I_u \end{aligned} \quad (7)$$

Por su parte, el International Electrotechnical Commission (IEC) estableció en 1999 una estandarización para los requerimientos de seguridad de los sistemas en generadores con turbinas de viento, siendo de manera específica el estándar 61400-1 [8]. La Tabla 1 provee los valores de z_0 para varios tipos de paisajes que rodeen a la turbina de viento.

Tabla 1. Valores de longitud de rugosidad, z_0 , para varios tipos de ambiente [9, 10].

Tipo de Ambiente	Rango de z_0 (m)
Mar abierto o arena	0.0001-0.001
Nieve	0.001-0.005
Césped bajo o estepas	0.001-0.01
Césped largo o tierra rocosa	0.04-0.1
Bosques o ciudades	1-5

$$I_u = I_{15} \left(\frac{a + \frac{15}{U}}{a + 1} \right) \quad (8)$$

Donde:

$I_{15} = 0.18$, $a = 2$, para lugares de alta turbulencia,
 $I_{15} = 0.16$, $a = 3$, para lugares de baja turbulencia,
 $I_v = 0.8I_u$ intensidad de turbulencia lateral,
 $I_w = 0.5I_u$, intensidad de turbulencia vertical.

Por último, las “Rules and regulations IV – Non-marine technology, Part 1 – Wind Energy” de Germanischer Lloyd [11] especifica simplemente el 20 por ciento de la intensidad de turbulencia. A fin de mostrar las diferencias que imponen las diversas normas en el valor de la intensidad de turbulencia longitudinal, se procedió a efectuar el trazado de este parámetro para diferentes valores de la velocidad del viento (m/s). La Figura 1 muestra los trazados de la intensidad de turbulencia longitudinal para el DS [7], IEC [8] y Germanischer Lloyd [11]. En todo caso se ha considerado una altura de 50m, con una longitud de rugosidad de 0.3 y 0.03m respectivamente.

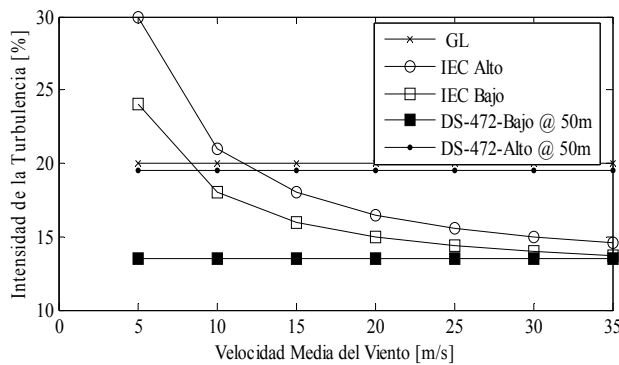


Figura 1. Intensidad de turbulencia para varios estándares.

3.4.2. Espectro de turbulencia

El espectro de turbulencia describe el contenido de las variaciones de frecuencia de la velocidad del viento. El espectro debe aproximarse al límite asintótico proporcional para $n^{-5/3}$ en alta frecuencia (donde n denota la frecuencia, en Hz). Estas relaciones están basados en el hecho de que el espectro decae según lo hacen las turbulencias de Eddies a más altas frecuencias, debido a la energía disipada en calor. Dos expresiones alternativas para el espectro de la componente longitudinal de turbulencia son comúnmente usadas, ambas tendientes al límite asintótico. Estas son el espectro de Kaimal y el espectro de von Karman [5]:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{1u}/\bar{U}}{(1 + 6nL_{1u}/\bar{U})^3} \quad (9)$$

Espectro Kaimal

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{2u}/\bar{U}}{\left(1 + 70.8\left(\frac{nL_{2u}}{\bar{U}}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}} \quad (10)$$

Espectro von Karman

donde:

$S_u(n)$ es la función de la densidad auto-espectral para la componente longitudinal,

L_{1u} y L_{2u} son escalas de longitud.

Estas dos formas poseen el mismo límite asintótico de alta frecuencia, y las escalas de longitud deben ser relacionadas con el radio $(36/70.8)^{-5/4}$ $L_{1u} = 2.329L_{2u}$.

3.4.3. Escalas de longitud y otros parámetros

Las escalas de longitud dependen de la rugosidad de la superficie z_0 , como también de la altura sobre la tierra (h); la proximidad a la tierra restringe el tamaño de los torbellinos turbulentos y así reduce las escalas de longitud. Hay algunos pequeños obstáculos sobre la tierra de altura típica h' , la altura sobre la tierra debería ser corregida por el efecto de esas asunciones, siendo la altura efectiva de la superficie de la tierra $h = 2.5z_0$. Alturas considerables sobre la tierra, para $h > h_i$, la turbulencia no es restringida por la proximidad a la superficie y se transforma en isotrópica. De acuerdo ESDU [12], $z_i = 1000z_0^{0.18}$ y esta altura $^xL_u = 280m$, y $^yL_u = ^zL_u = ^xL_v = ^zL_v = 140m$. Incluso para muy pequeñas de longitudes de rugosidad z_0 , la región isotrópica es la altura de una turbina de viento y entonces debe ser aplicada la corrección para $h < h_i$:

$$\begin{aligned} ^xL_u &= 280 \left(\frac{h}{z_i}\right)^{0.35} & ^yL_u &= 140 \left(\frac{h}{z_i}\right)^{0.38} \\ ^zL_u &= 140 \left(\frac{h}{z_i}\right)^{0.45} & ^xL_v &= 140 \left(\frac{h}{z_i}\right)^{0.48} \\ ^zL_v &= 140 \left(\frac{h}{z_i}\right)^{0.55} \end{aligned} \quad (11)$$

Junto con $^xL_w = ^yL_w = 0.35z$ (para $h < 400m$). Las expresiones para yL_v y zL_w no son dadas. Las escalas de longitud xL_u , xL_v y xL_w puede ser usadas directamente en el espectro de von Karman. Para éste,

el espectro de Kaimal tiene $L_{1u} = 2.329^x L_u$, y para lograr la misma asíntota de la alta frecuencia para la otra componente también se tiene $L_{1v} = 3.2054^x L_v$, $L_{1\omega} = 3.2054^x L_\omega$. Un trabajo posterior se basó en medidas para un gran rango de alturas [13, 14] tomando en cuenta el incremento en las escalas de longitud con el espesor de la capa límite, h , que también implica una variación de las escalas de longitud con velocidad del viento promedio. Esto lleva a expresiones más complicadas para las escalas de longitud en términos de h/z , σ_u/u^* y el número de Richardson $u^*/(f z_0)$.

Escala de longitud normalizada. El código para la práctica de las cargas y la seguridad en la construcción de las turbinas de viento [7] de DS especifica el espectro de Kaimal como:

$$\begin{aligned} L_{1u} &= 150m \text{ o } 5h \text{ para } h < 30m, \\ L_{1v} &= 0.3L_{1u}, \quad L_{1\omega} = 0.1L_{1u} \end{aligned} \quad (12)$$

El IEC 61400-1 recomienda un modelo de Kaimal:

$$\begin{aligned} L_{1u} &= 170.1m \text{ o } 5.67h \text{ para } h < 30m, \\ L_{1v} &= 0.3333L_{1u}, \quad L_{1\omega} = 0.08148L_{1u} \end{aligned} \quad (13)$$

De igual modo IEC 61400-1 establece que el modelo isotrópico de von Karman:

$$\begin{aligned} {}^x L_u &= 73.5m, \text{ o } 2.45h \text{ para}, \\ {}^x L_v &= {}^x L_\omega = 0.5^x L_u \end{aligned} \quad (14)$$

Por su parte el Eurocode [15], “Eurocode 1: Basis of design and actions on structures – part 2.4: Actions on structures – Wind actions” especifica el espectro longitudinal de la forma de Kaimal con $L_{1u} = 1.7L_i$, donde:

$$L_i = 300 \left(\frac{h}{300} \right)^\varepsilon \quad (15)$$

Para $h < 300m$, con ε variando entre 0.13 sobre aguas abiertas, 0.46 en áreas urbanas. Este estándar es usado para edificios y no es usual para turbinas de viento. A fin de mostrar las diferencias que imponen las diferentes normas en la longitud de escala se pro-

cedió a efectuar el trazado de los espectros de turbulencia longitudinal normalizados: Karman, Kaimal, Danish Estándar y Eurocode, para diferentes frecuencias. En la Figura 2 se muestra que el espectro de Eurocode cambia a más bajas frecuencias. Existen evidentes diferencias en las características entre el espectro de Kaimal y von Karman, siendo el último el que alcanza el mayor valor de espectro de turbulencia normalizado y a una frecuencia más alta. Por su parte, se muestra una semejanza en las curvas obtenidas entre Kaimal y Danish Standard Figura 2.

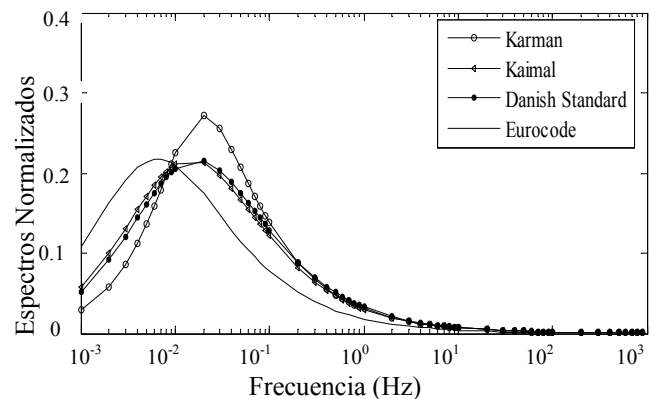


Figura 2. Comparación de espectros de la turbulencia normalizados. Velocidad del viento 10m/s, rugosidad de 0.001m.

Debido a la importancia que el espectro de turbulencia longitudinal posee sobre la simulación del viento, se efectúa una comparación más, que es mostrada en la Figura 3 (mayor velocidad de viento al empleada en la Figura 2).

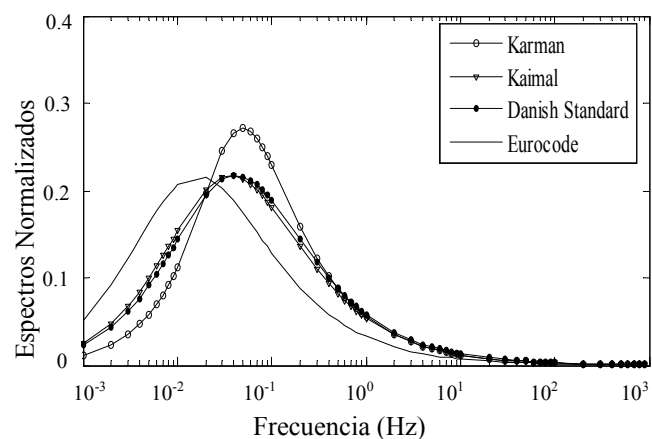


Figura 3. Comparación de espectros de la turbulencia normalizados. Velocidad del viento 25m/s, rugosidad de 0.001m.

En la Figura 3 se muestra que los espectros normalizados de turbulencia son desplazados a frecuencias más altas y sus valores máximos son mayores que los logrados con la velocidad de viento menor. Se puede apreciar que además del desplazamiento hacia la derecha en el eje de frecuencia el DS y las IEC se encuentran a más altas frecuencias que el modelo presentado por el Eurocode. Y a medida que aumentan la velocidad promedio se desplaza a zonas de más altas frecuencias. Tomando en cuenta las diferentes consideraciones para la que se estudia la turbulencia, se presenta a continuación el cálculo de la densidad del espectro establecido por el DS. La componente turbulenta de la velocidad del viento es caracterizada por la densidad del espectro de potencia $S_{wt}(f_i)$ [4], que queda definida por:

$$S_{wt}(f_i) = \frac{1}{\left(\ln\left(\frac{h}{z_o}\right)\right)^2} l_{v_{wa}} \frac{1}{\left(1 + 1.5 \frac{f_i l}{v_{wa}}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (16)$$

A continuación se muestra la ecuación que refleja esto:

$$P_{Dt}(f) = l_{v_{wa}} \left[\ln\left(\frac{h}{z_o}\right) \right]^{-1} \left[1 + 1.5 \frac{f l}{v_{wa}} \right]^{-5/3} \quad (17)$$

Donde:

P_{Dt} es la densidad de potencia de la turbulencia para cierta frecuencia (W/Hz);

f es la frecuencia (Hz);

h es la altura de la velocidad del viento (m), que normalmente es igual a la altura del eje de la turbina de viento;

v_{wa} es la velocidad de viento medida (m/s);

l es la longitud de la turbulencia medida en (m), que es igual a 20h si h es menor que 30m, e igual a 600 si h es mayor que 30m; y

z_o es longitud de rugosidad (m). La longitud de rugosidad depende sobre la estructura del paisaje que rodea la turbina de viento. Los valores de la rugosidad están dados por la Tabla 1.

El paso final es derivar una serie de tiempo para valores de velocidad del viento con una densidad de espectro de potencia según la ecuación (16) para ser aplicado en la simulación. Se hace necesario un méto-

do para generar una serie de tiempo de una densidad de potencia espectral dada. Éste se basa en la suma de un gran número de funciones senoidales con diferentes frecuencias y amplitudes, y que es determinada por la densidad potencia espectral, de donde será derivada la serie de tiempos.

La densidad de potencia espectral sólo contiene la información sobre la amplitud de varias componentes de la frecuencia de la señal, pero ninguna información sobre el ángulo de fase. En el dominio del tiempo, sin embargo, la amplitud y el ángulo de fase del seno orientan las componentes de la señal que deben conocerse. Por consiguiente, para derivar una serie de tiempo del espectro de densidad de potencia dado, se hace necesario conocer el ángulo de fase de cada una de las componentes de la frecuencia. Un método lo se hace escogiendo aleatoriamente el ángulo la fase inicial de cada una de las componentes de la frecuencia que son incluidas en la serie de tiempo en el intervalo de 0 a 2π [4]. Así, una cantidad infinita de series de tiempo aleatorias corresponde a una sola densidad de potencia espectral. La siguiente ecuación expone la componente de la turbulencia donde el f_i y ϕ_i son la frecuencia y la fase inicial del componente de frecuencia de i -ésima.

$$v_{wt}(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_{wt}(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \phi_i + \Delta\phi) \quad (18)$$

Δf debe escogerse entre 0.1 y 0.3 Hz y n igual o superior a 50 es usual [16]. El término $\Delta\phi$ en la ecuación (18), es una pequeña componente de fase aleatoria que se agrega a cada paso de tiempo para evitar periodicidad de la turbulencia. Matemáticamente, este término vuelve el proceso estacionario descrito por la ecuación (18) en un proceso del cuasiestacionario [17].

4. MODELO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO PARA GRANDES ESCALAS DE TIEMPO

El espectro de potencia de la velocidad del viento horizontal es calculado en un rango de 0.0007 a 900 ciclos/h, es decir, más de seis décadas. Un rango tal de frecuencias contiene el dominio espectral que describe las variaciones a mediano y a largo plazo, así como el rango espectral de la componente de turbulencia. Considerando el modelo de van der Hoven, se ha desarrollado un procedimiento para la simulación

numérica de la velocidad del viento, basado en un muestreo del espectro. Tomando en cuenta la frecuencia angular discreta, ω_i , $i = 1, N+1$ y $S_{vv}(\omega_i)$ los valores correspondientes de la densidad espectral. El armónico para frecuencia ω_i tiene una amplitud A_i [16] dad por:

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S_{vv}(\omega_i) + S_{vv}(\omega_{i+1})] [\omega_{i+1} - \omega_i]} \quad (19)$$

La velocidad del viento $v_w(t)$, es simulado con la relación:

$$v_w(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (20)$$

donde, $\omega_0 = 0$, $\varphi_0 = 0$ y $A_0 = v_{wa}$, siendo v_{wa} la velocidad promedio del viento, calculado en un horizonte de tiempo mayor que el período más grande en van der Hoven ($T=2\pi/\omega_1$). Y la fase φ_i que es generada al azar con una distribución uniforme en el dominio $[-\pi, \pi]$ [16]. Dado un valor N para la muestra de la operación característica de van der Hoven, se toma la siguiente variación de las frecuencias discretas: $f_i = i \cdot 10^k$, donde i y k son valores numéricos de muestreo que se corresponden para lograr el valor de N [9]. El modelo de van der Hoven no puede ser usado para una descripción completa de la velocidad del viento, sobre una escala de tiempo en segundos, minutos, horas, porque este modelo posee la siguiente desventaja: la componente de la turbulencia es tratada como un proceso aleatorio estacionario. El modelo básico de la densidad de turbulencia viene dada por ecuación del espectro de von Karman (19), que para este caso se utiliza en función de la frecuencia angular discreta $S_{vv}(\omega_i)$ [16].

5. SIMULACIONES DEL MODELO ESTOCÁSTICO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

A fin de validar el modelo estocástico de la velocidad del viento se procedió a implementar un programa en Matlab utilizando la metodología descrita. Se ha propuesto reproducir la curva de velocidad de viento aportada por Slootweg [4] en su tesis doctoral. Antes de proceder con la simulación se han configurado los parámetros necesarios cuyos valores se muestran en la Tabla 2.

En la Figura 4 se representa la curva patrón de velocidad del viento en el tiempo obtenida en [4], la cual ha sido reproducida aquí respetando la originalidad de la misma.

Tabla 2. Parámetros asumidos para la modelación del viento por el modelo estocástico [4].

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	60.00 s
Paso de Tiempo	0.20 s
Velocidad promedio del viento	11.50 m/s
Altura	30.00m
Comienzo de la ráfaga	10.00 s
Final de la ráfaga	20.00c
Comienzo de la rampa	30.00 s
Final de la rampa	50.00 s
Amplitud de la ráfaga	4.00 m/s
Amplitud de la ráfaga	4.00 m/s

El resultado obtenido en la simulación del viento mediante un modelo estocástico es comparado con una curva patrón que se muestra en la Figura 4, esto se hace con el fin de comprobar y validar el correcto funcionamiento del modelo presentado. La curva de la Figura 5 tiene semejanza y parecido a la curva patrón (Figura 4), los resultados obtenidos no son idénticos debido a la presencia en el modelo estocástico de la componente turbulencia que hace uso de una variable aleatoria.

Se observan pequeñas discrepancias, las mismas son ubicadas en los puntos máximos, esto se debe al desplazamiento causado por el ángulo aleatorio φ . Sin embargo se puede concluir que salvo los aspectos aleatorios involucrados en la componente de turbulencia, el modelo presentado se comporta de manera adecuada para la simulación del comportamiento de la velocidad del viento.

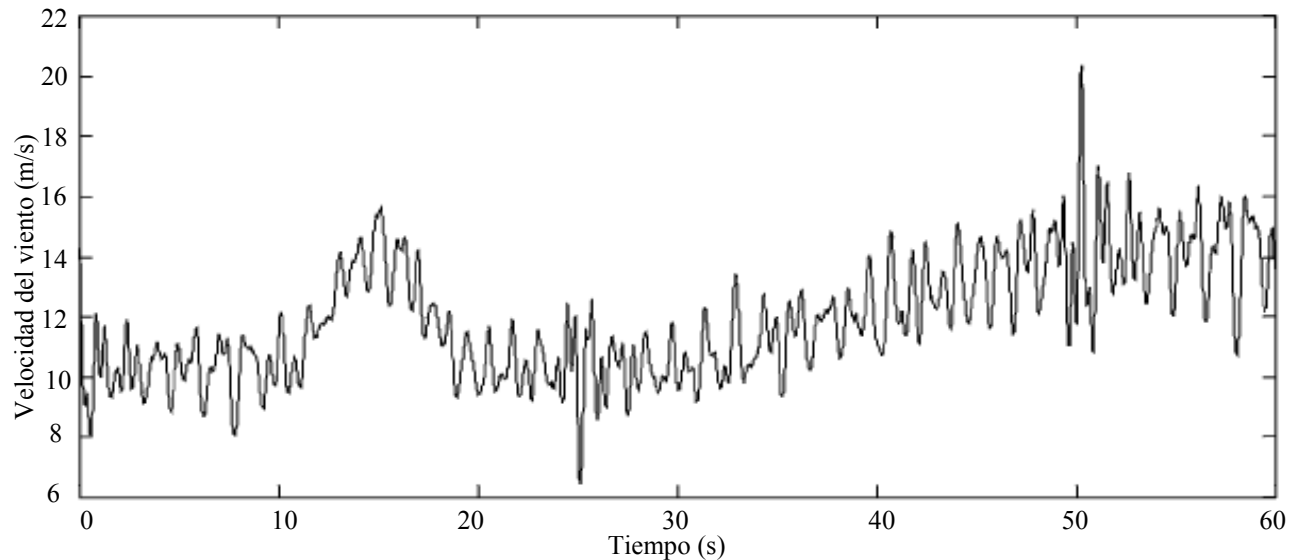


Figura 4. Velocidad del viento obtenida en [4].

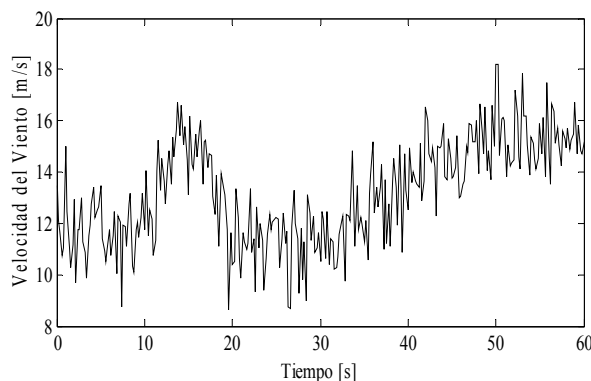


Figura 5. Velocidad del viento obtenida mediante la simulación del modelo estocástico.

6. CONCLUSIONES

Un modelo matemático de naturaleza estocástica fue presentado en este artículo para la simulación de la velocidad del viento. El modelo puede ser empleando, con muy pocas consideraciones, para simular los fenómenos dominantes en la velocidad del viento en dirección horizontal, tanto en escalas cortas de tiempo (orden de los segundos) como para grandes escalas de tiempo (minutos, horas e inclusive días). El modelo estocástico adecuado, para la simulación de la velocidad del viento a pequeña escala, considera que la velocidad del viento está constituido por la suma de cuatro componentes que recogen los posibles fenómenos dominantes dentro de la serie de tiempo: valor

promedio, componentes de rampa, ráfaga y turbulencia. En el caso de grandes escalas, se considera una mayor distribución espectral de frecuencias considerando lo aportado por van der Hoven. Los modelos presentados resultan ser de una gran utilidad para el análisis y simulación del comportamiento de la velocidad del viento en dirección horizontal, en una amplia escala de tiempo.

Finalmente se procedió a la implementación del modelo presentado en Matlab y se simuló una serie de tiempo para la velocidad del viento, bien reconocida en la literatura. Los resultados obtenidos en la simulación son satisfactorios respecto al comportamiento exhibido en la literatura, con muy pequeñas discrepancias provenientes de la variable aleatoria, atribuible al comportamiento de la turbulencia en la velocidad del viento.

7. REFERENCIAS

- [1] Rodríguez Amenedo J.L , Burgos Diaz, J.C. y Arnalte Gómez S.(2003): "Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica", Editorial Rueda S.L., Madrid.
- [2] By Tiedtke M. (2002): The general problem of parametrization, Meteorological Training Course Lecture Series.
- [3] Burton T, Sharpe D, Jenkins N. y Bossanyi E. (2001): "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England.

- [4] Slootweg J.G. (2003): "Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", PhD Thesis on Delft University of Technology. Netherland.
- [5] Ackermann T. (2005): "Wind Power in Power Systems", Royal Institute of Technology, Editorial John Wiley and Sons, Ltd, Stockholm, Sweden.
- [6] ESDU, (1985): "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)", ESDU 85020 (amended 1993), Engineering Sciences Data Unit, UK. 1985.
- [7] The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers, (1992): "Code of practice for loads and safety of wind turbine constructions DS 472".
- [8] IEC, (1999): "Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements", International Standard 61400-1, Second Edition. International Electrotechnical Commission.
- [9] Panofsky H.A. y Dutton J.A. (1984): "Atmospheric turbulence; models and methods for engineering applications", US: John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [10] Simiu E. y Scanlan R.H. (1986): "Wind effects on structures: an introduction to wind engineering", US: John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, New York, 1986.
- [11] Germanischer L.(1993): "Rules and regulations IV – Non-marine technology, Part 1 – Wind Energy", (supplemented 1994, 1998). Germanischer Lloyd.
- [12] Petersen, E.L. et al., (1998): "Wind power meteorology. Part I: Climate and turbulence", Wind Energy, 1, 1, 2–22.
- [13] ESDU, (1975): "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part III: Variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere)", ESDU 75001, Engineering Sciences Data Unit, UK.
- [14] Harris, R. I., (1990): "Some further thoughts on the spectrum of gustiness in strong winds", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 33, 461–477.
- [15] Eurocode, (1997): "Eurocode 1: Basis of design and actions on structures – part 2.4: Actions on structures – Wind actions".
- [16] Nichita C, Luca D, Dakyo B. y Ceanga E. (2002): "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, no. 4, December 2002.
- [17] Gunaratnam M, Novotny D.W. (1980): "The effects of neglecting stator transients in induction machine modelling", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.99, n.6., pp.2050-2059, Nov./Dec 1980.
- [18] Normas IEC: 61400-1, "Wind Turbine Generator Systems", Part 1: Safety Requirements, 1998