
SIMULACIÓN DEL VIENTO ATMOSFÉRICO Y APLICACIÓN EXPERIMENTAL

ATMOSPHERIC WIND SIMULATION AND EXPERIMENTAL APPLICATION

William Gómez Rivera¹
Luís Eduardo Llano²

Fecha de Recepción: 03 de mayo de 2006

Fecha de Aprobación: 20 de junio de 2006

RESUMEN

La energía eólica se muestra como una alternativa técnica y económica con posibilidades de ser implementada en zonas en donde por sus necesidades energéticas y características meteorológicas esta tecnología sea posible. Se relacionan a continuación los parámetros básicos a tener en cuenta en el estudio del comportamiento del viento atmosférico en la capa límite, como un proceso aleatorio estacionario y en condiciones de atmósfera neutra. Con base en lo anterior se establece en este trabajo el procedimiento que se debe seguir durante un proceso de simulación del viento atmosférico mediante la determinación de la función de densidad espectral (PSD) que aproxime la intensidad de turbulencia de las fluctuaciones de la velocidad del viento. Haciendo uso del simulador de aerogenerador del laboratorio de Ing. Mecánica de la Universidad de los Andes se programan los perfiles de velocidad del viento medido y del viento simulado, comparándose en cada caso la potencia generada.

Palabras Clave: *Simulación del viento, función de densidad espectral de potencia, simulación de un aerogenerador, Von Karman, intensidad de turbulencia.*

ABSTRACT

The wind power appears as a technical and economic alternative with possibilities of being implemented in zones where for its energetic needs and meteorological characteristic this technology is possible. The basic parameters for the behaviour of the atmospheric wind in the boundary layer study are related later, as a random stationary process and in conditions of neutral atmosphere. With base in the previous thing there is established in this work the procedure that must follow during a process of simulation of the atmospheric wind by means of the determination of the spectral density function (PSD) that should bring near the intensity of turbulence of the wind speed. Making use of the wind generator simulator, who is in the mechanical engineering laboratory at Los Andes University, the velocity profiles of the measured and simulated wind are programmed, comparing in each case the generated power.

Key words: *wind simulation, power spectral density function, wind generator simulation, von karman, turbulence intensity*

¹ Universidad Militar Nueva Granada. Docente tiempo completo – auxiliar. Magister of Science. Mechanical Engineer. william.gomezr@umng.edu.co gomez_riveraw2@asme.org. 2757300 Ext.: 311. Bogotá D.C. Colombia Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia

² Jefe Laboratorio de Diseño Mecánico UMNG. Docente Tiempo completo, Dpto. Ing. Mecatrónica UMNG. Estudiante Maestría en Ing. Mecánica, Universidad de los Andes. E-mail: luis.llano@umng.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de proyectos de generación mediante el uso de sistemas de conversión de energía eólica (SCEE) requiere que se tenga un conocimiento profundo sobre el comportamiento del viento y las variables que lo caracterizan, especialmente al interior de la capa límite atmosférica [6]. Para llegar a comprender el viento atmosférico es necesario conocer dichas variables y como se pueden establecer estas, en condiciones reales o de simulación.

El método de simulación del viento atmosférico, que a continuación se desarrolla, tiene como base el entendimiento de ciertas variables características del proceso original y la correlación que debe existir entre este y los resultados obtenidos mediante simulación. Dicha correspondencia se puede lograr simulando la intensidad de las fluctuaciones de velocidad del viento real y obteniendo a partir de esta, valores del mismo orden para la escala integral de longitud; otro procedimiento para determinar la intensidad de turbulencia del viento, es mediante la varianza de las fluctuaciones de las componentes direccionales del viento en un periodo considerado (normalmente no mayor a 1 hora). La varianza se podrá expresar entonces en términos de la función de densidad espectral del proceso original [6].

Con el fin de simplificar el procedimiento de simulación, se realizan algunas consideraciones básicas, como son: el proceso real se presenta en una atmósfera neutra, homogénea y con variaciones unidimensionales de la velocidad longitudinal del viento. No se tienen en cuenta las variaciones transversales ni verticales de la velocidad media del viento, sin embargo es posible simular

procesos homogéneos haciendo uso de métodos similares que tienen en cuenta condiciones multidimensionales y multivariadas [22].

II. PARAMETROS CARACTERÍSTICOS DEL VIENTO ATMOSFÉRICO

La variable física que caracteriza el comportamiento del proceso aleatorio de la fluctuación de la velocidad del viento alrededor de una media cuasi-estacionaria se conoce como turbulencia, la cual es causada por la disipación de la energía cinética del viento en energía térmica mediante la creación y destrucción progresiva de pequeños vórtices (remolinos o ráfagas). Sin embargo, siendo la turbulencia atmosférica un proceso completamente aleatorio, esta tiene ciertos rasgos distintivos que son determinados por propiedades estadísticas, las cuales se relacionan a continuación tal y como son definidas por Manwell [14].

A. Intensidad de Turbulencia

Se define como la relación entre la desviación estándar y la media de los datos correspondientes a las series de velocidad de viento en un período de tiempo corto (no mayor a una hora) y por convención usualmente igual a diez minutos [14]:

$$I.T. = \frac{\sigma_u}{U} \quad (1)$$

B. Función de Densidad de Probabilidad de la Velocidad del Viento

Describe la tendencia que presenta la velocidad del viento en torno a un valor medio (distribución normal). Se expresa como [14]:

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(u - \bar{U})^2}{2 \cdot \sigma_u^2} \right] \quad (2)$$

C. Función de Autocorrelación

La función de autocorrelación suministra información respecto al valor medio alrededor del cual se desarrolla la función de densidad de probabilidad y se define como [14]:

$$R(r \cdot \delta t) = \frac{1}{\sigma_u^2 \cdot (N_s - r)} \sum_{i=1}^{N_s - r} u_i \cdot u_{i+r} \quad (3)$$

donde r es el tiempo de retardo.

D. Escala Integral de Tiempo y Escala Integral de Longitud

La escala integral de tiempo se define como la medida temporal promedio sobre la cual las fluctuaciones de la velocidad del viento están autocorrelacionadas y se determina mediante la integración de la función de autocorrelación desde un tiempo de retardo r igual a cero hasta el punto en donde la función intercepta por primera vez el eje de las abscisas.

El producto de la escala integral de tiempo por la velocidad media de viento suministra la escala integral de longitud L_x :

$$L_x = T \cdot \bar{U} \quad (4)$$

Este concepto se conoce también como macroescala y representa el tamaño medio de los vórtices de mayor tamaño presentes en el flujo de aire.

E. Función de Densidad Espectral de Potencia (PSD)

Es la función que describe la relación entre las frecuencias presentes en el proceso real y la amplitud de las ondas senos-

oidales variantes que generan la fluctuación de la velocidad del viento.

Existen dos puntos de interés que deben ser tenidos en cuenta en el análisis de la PSD [14]. El primero, es que la energía promedio presente en la turbulencia respecto a un rango de frecuencias puede ser expresada como la integral de la PSD entre las dos frecuencias; y el segundo, que la integral sobre toda las frecuencias es igual a la varianza total de las fluctuaciones de velocidad.

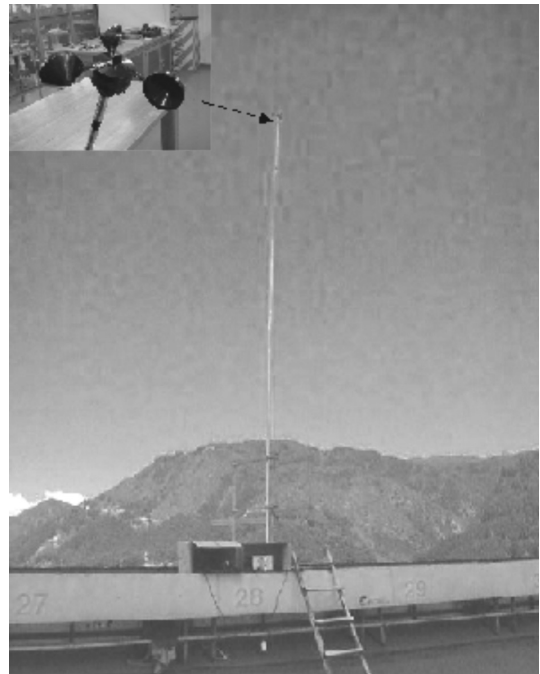


Figura 1. Montaje anemómetro NRG-40 en cubierta del ECCI

III. MEDICIÓN DEL VIENTO ATMOSFÉRICO

Las series reales de velocidad del viento atmosférico, se obtuvieron mediante el uso de un anemómetro de cazoletas tipo NRG Systems referencia 40, y mediante el desarrollo de una pequeña rutina en LabVIEW®.

La Figura 1 muestra el montaje realizado para el registro de la velocidad del viento en la cubierta del edificio Bancafé (Edificio Centro Comercial Internacional- ECCI) ubicado en el centro de la ciudad de Bogotá D.C.; la cubierta de la edificación se encuentra a 180 m sobre el nivel de la calle. Con el fin de disminuir el efecto de la estructura sobre el viento medido, se instaló el anemómetro a una altura de 10 metros sobre el nivel más alto de la cubierta.

Los registros de velocidad del viento se realizaron entre el 10 de febrero y el 11 de marzo de 2004, de allí se extractaron las series de viento más representativas (especialmente por la ausencia de registros nulos, causados por el cambio de dirección del viento). Lo que finalmente permitió obtener series con duraciones alrededor de los 10 minutos, con registros cada 2 segundos.

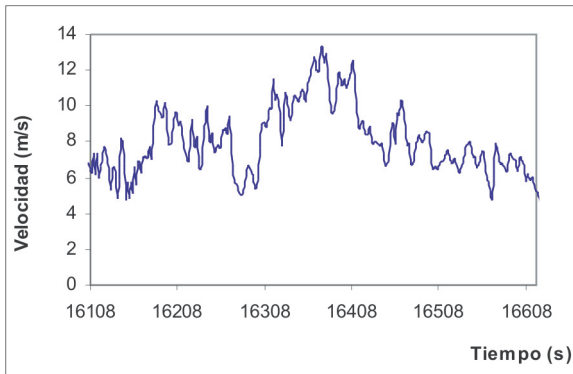


Figura 2. Representa el perfil de velocidad del viento

La Figura 2 representa el perfil de velocidades correspondiente a una muestra de las series medidas. La duración de la muestra es de 512 segundos y los análisis que a continuación se muestran se refieren como ejemplo a esta serie en particular.

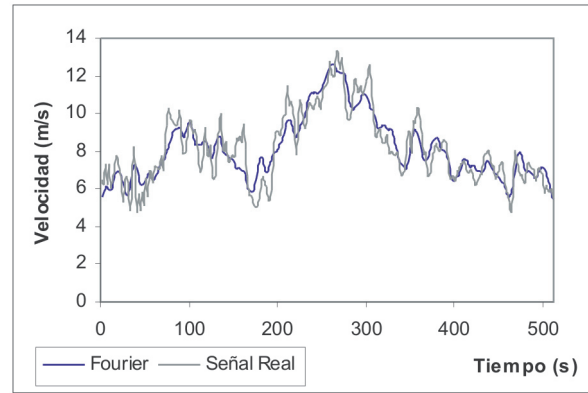


Figura 3. Aproximación por FFT

Una vez se registró esta información, se desarrolló el espectro de frecuencias característico en cada uno de los perfiles de velocidad muestreados mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT). Esto determinó en cada caso cuál era el rango de frecuencias particular de la onda registrada.

Con esta información se desarrolló la serie de Fourier que permitía reproducir los datos obtenidos en campo. El gráfico 3 muestra la relación entre la señal obtenida mediante series de Fourier y la señal medida.

IV. MODELOS TEÓRICOS DE LA PSD

La base para cualquier método de simulación de la turbulencia atmosférica es la función de densidad espectral de potencia (PSD). De allí que sean variados los modelos propuestos por diferentes autores, y que se ajustan de acuerdo con el tipo de análisis que se desee realizar. En una primera aproximación al comportamiento del proceso medido se desarrolló la PSD para los modelos propuestos por von Karman, Kaimal, Davenport y Frost [26] [15] [25], los resultados se muestran en la Figura 4. Se encuentra que los

modelos con mejor aproximación al proceso medido corresponden a los establecidos por von Karman y Davenport. Las expresiones que los determinan son:

Modelo Von Karman

$$S(f) = \frac{4 \cdot (5,7 \cdot u_*^2) \cdot L_x / \bar{U}}{1,339 \cdot (1 + 39,48 \cdot (f \cdot L_x / \bar{U})^2)^{5/6}} \quad (5)$$

Modelo Davenport

$$S(f) = \frac{2 \cdot X^2 \cdot \sigma^2}{f \cdot (3 \cdot (1 + X^2)^{4/3})} \quad \text{con } X = \frac{f \cdot L}{\bar{U}} \quad (6)$$

donde $L = 1200$

La escala integral de longitud – macroescala – puede ser aproximada mediante:

$$L_x = \frac{\bar{U}}{f \cdot 2 \cdot \pi} \quad (7)$$

El cortante de velocidad u_* se define como:

$$u_* = \frac{0,4 \cdot \bar{U}}{\ln(z / z_0)} \quad (8)$$

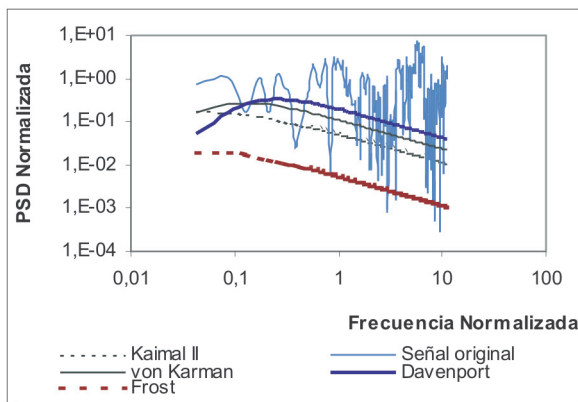


Figura 4. PSD de las fluctuaciones de velocidad del viento para los datos de la Figura 2

Aplicando las ecuaciones (5) y (6) a las series de viento medidas, se desarrolló el gráfico de la Figura 4, el cual contiene la función de densidad espectral normalizada en términos de la frecuencia normalizada [11].

La función de densidad espectral para las fluctuaciones de velocidad del viento medidas, se determinó mediante la relación entre la señal RMS de las fluctuaciones y la frecuencia calculada a partir de la FFT [14]. Haciendo uso de los modelos de Davenport y von Karman, es posible demostrar que un proceso $x(t)$ puede ser simulado mediante el uso de expresiones como las utilizadas por Yang [29] y Veers [25], las cuales representan series de tiempo en función de senos y cósenos con un ángulo de fase aleatorio:

$$v(t) = \bar{V} + \sum_{j=1}^n A_j \cdot \text{Sin}(\omega_j \cdot t) + B_j \cdot \text{Cos}(\omega_j \cdot t) \quad (9)$$

en donde,

$$A_j = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot S_f \cdot \Delta\omega \cdot \text{Sin}(\phi_j)} \quad (10)$$

$$B_j = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot S_f \cdot \Delta\omega \cdot \text{Cos}(\phi_j)}$$

ϕ_j es una variable uniformemente distribuida entre 0 y 2π , la cual le da el carácter aleatorio a la simulación y S_f es la PSD que caracteriza el proceso. Variando ϕ_j se pueden obtener series de velocidad del viento con las mismas características (\bar{U} , L_x e I.T) del proceso medido.

Siguiendo lo expuesto en II para los modelos de PSD definidos por Davenport y von Karman, se tiene que:

Tabla 1. Intensidad de Turbulencia y escala integral de tiempo para las series de velocidad del viento obtenidas por simulación

Modelo	I.T. (%)	L_x (m)
Señal medida	23,2	260
Karman	22,6	230
Davenport	24,2	97

De la Tabla 1, la cual corresponde a la simulación del proceso medido expuesto en el gráfico 2 y la Figura 4 se puede extraer entonces que el modelo para la función de densidad espectral que mejor se ajusta al proceso medido es el expuesto por Von Karman. Se generan las series de datos que simulan el comportamiento fluctuante del proceso real, Figura 5.

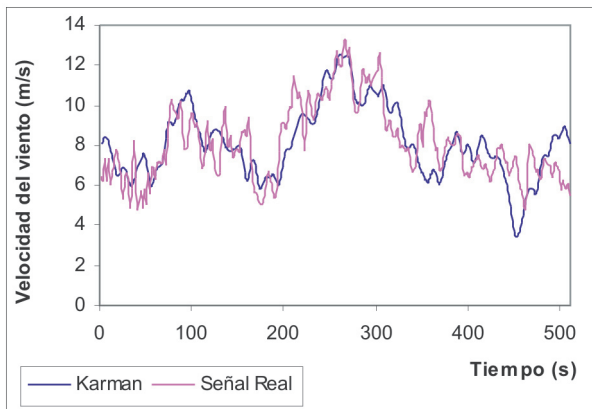


Figura 5. Fluctuación de la velocidad del viento para la serie de datos de la Figura 2

V. PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN

Uno de los objetivos finales de este trabajo fue el de establecer una metodología que permitiera conocer el comportamiento de un aerogenerador frente a las fluctuaciones de velocidad del viento atmosférico. Para tal fin se utilizó el banco de pruebas para aerogenerador que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Mecánica (sección de Aerodinámica y Energía Eólica) de la Universidad de los Andes. Allí se programaron los diferentes perfiles de viento (reales y simulados) y se registró la potencia desarrollada en cada caso por el aerogenerador.

A. Banco de Simulación

El banco de pruebas se compone de dos partes principales: El generador de imanes permanen-

tes con sus accesorios y los sistemas que controlan la velocidad de giro.

El simulador esta compuesto por un generador de imanes permanentes marca WHISPER referencia H900, un volante que reemplaza la inercia del rotor real, un motor trifásico de jaula de ardilla de 1100 rpm a 60 Hz y 2 HP de potencia que simula el movimiento que el viento le imprime al rotor, una caja rectificadora de voltaje que convierte la señal A.C., que sale del generador, en una señal D.C, una batería de 12V y 375 Ah, cinco bombillos de 75 vatios a 12 V conectados en paralelo y un disipador de potencia que es el encargado de eliminar el exceso de potencia no consumida por la carga o por la batería [29].

El sistema que controla la velocidad de giro del motor consta de un variador de frecuencia referencia: Altivar 66, que controla la velocidad de giro del motor, un PLC marca Telemecanique - TXX Nano 10E/S y un selector de velocidades que permite seleccionar el tipo de señal que el PLC envía al variador de velocidad.

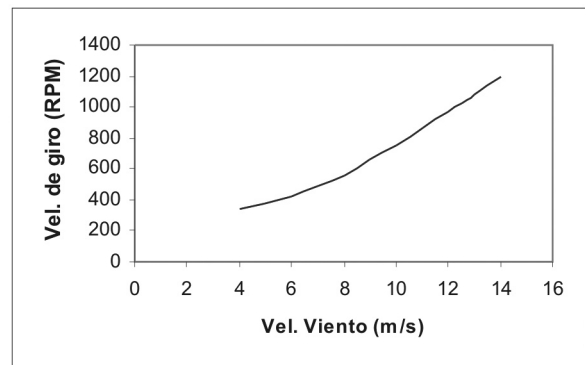


Figura 6. Relación entre la velocidad del viento y la velocidad de giro del aerogenerador

B. Programación del Simulador

Una vez obtenidas las series de viento que representan el proceso medido y el simulado, fue necesario relacionar estas con la velocidad de giro del aerogenerador. Esto se logró con base en la información dada por el fabricante del aerogenerador ($\phi = 1,05$ m) y la caracterización que suministró la expresión que relaciona la velocidad específica (λ) con la velocidad del viento [16], allí se asume un λ_{\max} igual a 11 y un λ_0 igual a 7. Igualmente se asumió que el producto entre la eficiencia global y el coeficiente de desarrollo del aerogenerador (C_p) es igual a 0,37. El gráfico de la Figura 6 muestra el resultado obtenido.

C. Resultados

La lectura de la potencia desarrollada por el generador bajo condiciones de velocidad fluctuante se realizó mediante el uso de analizadores de armónicos y osciloscopios, los cuales registraron en tiempo real el voltaje, corriente y factor de potencia en intervalos de 1 segundo.

Registrados los datos de potencia desarrollada por el aerogenerador estos se comparan en los gráficos de las Figura 7 a 9. Para el cálculo de la potencia teórica obtenible se utilizó la expresión [17] [13]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot \bar{U}^3 \quad (11)$$

Con el fin de resaltar la importancia de la metodología desarrollada en este trabajo se muestra en el gráfico de la Figura 10 una comparación entre la potencia obtenida manteniendo, para la serie de velocidad de viento de la Figura 2, la misma velocidad media (8,1 m/s e IT = 23 %) y variando la intensidad de turbulencia a 8 % y 34 %. Las tres curvas corresponden al perfil simulado.

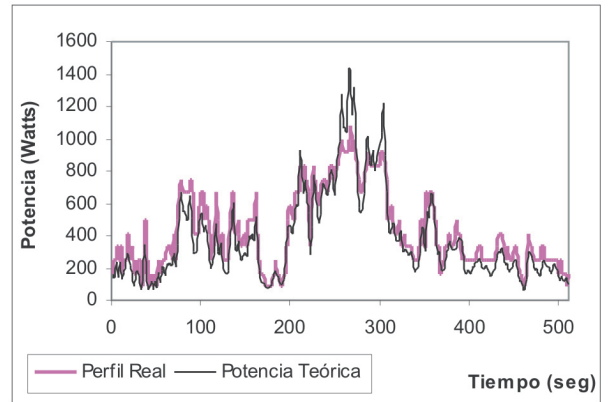


Figura 7. Comparación entre la potencia teórica y la generada mediante el uso del perfil medido

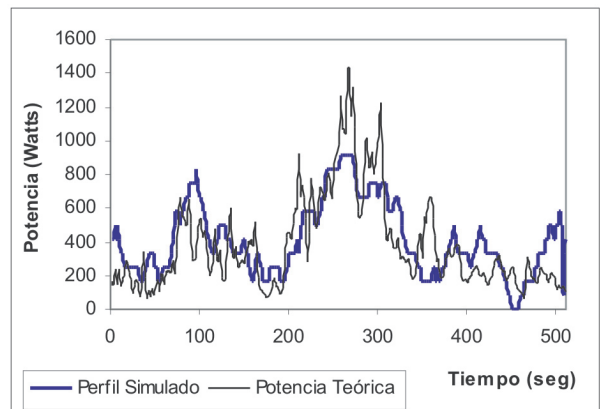


Figura 8. Comparación entre la potencia teórica y la generada mediante el uso del perfil simulado

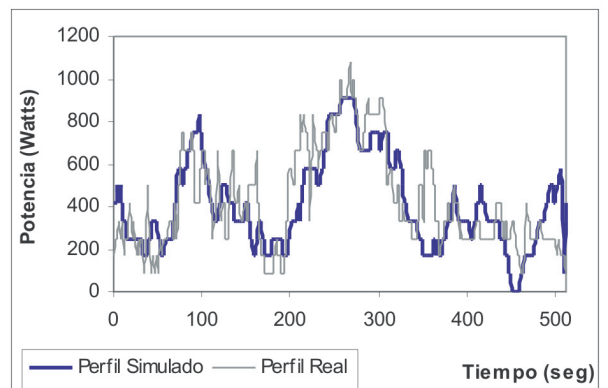


Figura 9. Comparación entre la potencia generada mediante el uso del perfil medido y la generada mediante el uso del perfil simulado

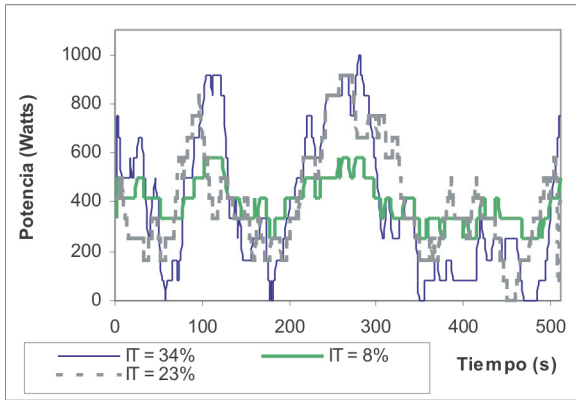


Figura 10. Potencia desarrollada por el generador Whisper H900 variando la intensidad de turbulencia a $U = 8,1$ m/s

VI. CONCLUSIONES

- Basados en el análisis inicial, es posible modelar el comportamiento del viento atmosférico conociendo la velocidad media, la intensidad de turbulencia, la escala integral de tiempo y la escala integral de longitud (macroescala).
- La intensidad de turbulencia puede ser representada a partir del desarrollo de un modelo adecuado de función de densidad espectral de potencia (PSD), el cual debe ser establecido con base en los parámetros básicos relacionados.
- La posibilidad de contar con un modelo estadístico que permita reconstruir una señal de viento real con base en los datos registrados por los anemógrafos y a partir de ella generar una metodología para estudiar la influencia de la velocidad del viento más allá de los datos medidos, se constituye en una herramienta clave para el estudio de comportamiento de aerogeneradores desde el punto de vista de potencia efectiva desarrollada.
- La metodología descrita en este trabajo se puede ajustar posteriormente, mediante el uso de

instrumentos de medida (anemómetros) más sensibles, que permitan frecuencias de muestreo más altas y se pueda determinar con mayor precisión el rango de armónicos característico del viento atmosférico en un emplazamiento en particular.

- Con el uso de esta metodología es ahora posible reproducir en condiciones de laboratorio las variables de operación reales de aquellos equipos que dependen directamente de la potencia desarrollada por un aerogenerador, sin la necesidad de esperar los resultados de su operación en el sitio específico en donde se les requiere (i.e. generación de baja potencia, bombeo y/o desalinización de agua).
- El procedimiento que se desarrolló en este estudio, se limita inicialmente a la capacidad del banco de pruebas (motor, volante de inercia, controles de velocidad) y de los aerogeneradores que en él se puedan montar para su posterior análisis. Sin embargo es posible realizar modelaciones del comportamiento de equipos de gran capacidad a partir de los datos obtenidos en el banco de pruebas.
- La aplicación de esta metodología se puede extrapolar, entre otras al estudio de estructuras que se vean afectadas por las variaciones de la velocidad del viento (i.e. puentes, edificios).

Lista de Símbolos

- f =frecuencia (Hz)
- z =altura sobre el nivel de piso (m)
- z_0 =coeficiente de rugosidad del terreno (m)
- U_{10} =Velocidad media del viento a 10 metros de altura (m/s)
- U =Velocidad media del viento a la altura de z metros (m/s)
- σ =desviación estándar de la velocidad del viento
- σ^2 =varianza de la fluctuaciones de velocidad de la señal medida (m^2/s^2)
- u_* =cortante de velocidad (m/s)
- L =escala integral de longitud (m)
- λ =velocidad específica de diseño del rotor

VII. REFERENCIAS

- [1] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA). SI:409 Basic air pollution meteorology course.
- [2] Asociación Danesa de la Industria Eólica. www.windpower.org. Consultada en 02/2004.
- [3] AHRENS, C. D. *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate and Environment*. Thomson Learning. New York, U.S.A. Seventh Edition. 2003.
- [4] BECKWITH, T.G., Et. al. *Mechanical Measurements*. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Fifth Edition. U.S.A. 1995.
- [5] BLESSMANN, J. *Ovento na engenharia estrutural*. Ed. Universidade, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 1995.
- [6] Caracterización de los recursos eólicos. www.uco.es/grupos/labvirtual/tutoriales/eolica/Proyecto/escuela.htm. Consultada en 11/2003
- [7] COCHRAN, Brad C., *The Influence of Atmospheric Turbulence on the Kinetic Energy Available During Small Wind Turbine Power Performance Testing*. Ceder - Ciemat. Spain April 2002.
- [8] DE BORTOLI, M., *Importancia del parámetro macroescala en los ensayos estructurales en túnel de viento y su determinación*. Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. 1998.
- [9] ESPINOSA, R. S. *Diseño y construcción de un control de velocidad del eje de un motor, para simular las condiciones de incidencia del viento en el rotor de un molino*. Universidad de Los Andes. 1998. Bogotá.
- [10] European Wind Energy Association. *Greenpeace. Wind Force 12. A Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020*. 2002.
- [11] HIRIART, D., Et al. *Wind power spectrum measured at the San Pedro Mártir sierra*, in *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*. Vol 37, pp. 213-220. Mexico. 2001
- [12] KAIMAL, J. C., Et al. *Spectral characteristics of surface-layer turbulence*, in *Quarterly J. R. Meteorological Society* Vol 98, pp. 563-589. 1972.
- [13] LYSEN, E.H. *Introduction to Wind Energy*. 2nd Edition. 1983. Documento PDF.
- [14] MANWELL, J.F., Et. al. *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*. Ed. John Wiley & Sons. New York, U.S.A. 2002.
- [15] MARIGHETTI, J. O., Et al. *Simulación del viento atmosférico como un proceso aleatorio estacionario*, in *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 5. Argentina. 2001
- [16] PINILLA, A., *Información suministrada personalmente, consecuencia de trabajos anteriores en el mismo campo*. Bogotá D.C. Universidad de Los Andes. 2004.
- [17] PINILLA, Alvaro. *Notas Curso Energía Eólica*. Enero 2003. Universidad de los Andes.

- [18] REY, N. A. Experimentación en el banco de pruebas de energía eólica. Universidad de Los Andes. 1999. Bogotá.
- [19] SANCHEZ E. SILVA C. EFICIENCIA ENERGÉTICA. Producción limpia para un desarrollo sustentable. 1996.
- [20] SANTOS, J. A. Diseño y construcción de un generador eléctrico de imanes permanentes para un sistema de energía eólica. Universidad de Los Andes. 2003. Bogotá.
- [21] Series de datos de viento suministrados por el IDEAM y la CAR Cundinamarca.
- [22] SHINOZUCA, M., & JAN, C.-M. "Digital Simulation of Random Processes and Its Applications", Journal of Sound and Vibrations, Vol. 25, No 1, pp. 111-128, 1972.
- [23] SØRENSEN, P., Et al. Simulation of Interaction Between Wind Farm and Power System., Risø National Laboratory, Roskilde. Denmark. December 2001.
- [24] THOMSON, W. T. Theory of vibration with Applications. Prentice - Hall. Second Edition. 1981.
- [25] VEERS, Paul S., Modeling Stochastic Wind Loads on Vertical Axis Wind Turbines. Sandia Report – SAND83-1909. Sandia National Laboratories. September 1984.
- [26] VEERS, Paul S., Three-Dimensional Wind Simulation. Sandia Report – SAD88-0152. Sandia National Laboratories. March 1988.
- [27] WITTEWER, A. R., Et al. Variación de los Parámetros característicos de una Simulación de la Capa Límite Atmosférica en un Túnel de Viento. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. 2001.
- [28] YANG, C. Y. Random vibration of structures. John Wiley & Sons Inc. New York, U.S.A. 1986
- [29] ZAPATA, ANA. Caracterización de un Generador de Imanes Permanentes. Universidad de Los Andes. 2001. Bogotá.