

**Reporte de Investigación
2007-12**

Modelado del Viento para Simulaciones Computarizadas de Sistemas de Potencia

Responsables: Amaya G. Omar R.
Cooz U. Marco A.
Duran M. Luís R.

Supervisor: Francisco M. González-Longatt



Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida



PROYECTO EOLO

Mar-2007

1. Modelación del Viento

Para el desarrollo de un proyecto de generación de electricidad donde el recurso eólico surge como fuente de energía primaria, es necesario conocer la naturaleza y comportamiento del viento, para poder comprender las características que presenta y así tomar en cuenta todos los aspectos que describen al fenómeno, con la finalidad de lograr un máximo aprovechamiento de la energía que se encuentran contenidas en este recurso para transformarla en energía mecánica y posteriormente en eléctrica.

Principalmente se puede decir que el viento se genera por el calentamiento no uniforme que sufre la tierra. El calentamiento es más intenso cerca del ecuador y durante el día, esto quiere decir que las zonas más calientes se mueven sobre la superficie de la tierra en su movimiento de rotación. Generalmente el aire caliente sube, para después circular por la parte superior de la atmósfera y caer en las zonas más frías. A nivel del suelo la circulación es en sentido inverso [1]. Por otro lado se tiene que al girar la tierra, arrastra al aire del oeste hacia el este, si además el aire se mueve hacia los polos, se acerca más al eje de giro de la tierra lo que implica que para que se conserve la cantidad de movimiento angular, el aire debe adquirir una componente oeste-este mayor que la del propio giro de la tierra. Este efecto es pequeño en el ecuador, donde el acercamiento al eje de la tierra es pequeño al desplazarse hacia los polos, pero es mayor a latitudes medias. A escalas suficientemente grandes de altura, del orden de los 1000 Km., el viento resulta fundamentalmente de un equilibrio entre la Fuerza de Coriolis, la Fuerza de Presión y el Rozamiento con el suelo. La Fuerza de Coriolis es perpendicular a la velocidad del aire y es a mano derecha de su trayectoria en el hemisferio norte y a la izquierda en el sur. Por encima de la capa límite terrestre, de unos mil metros de altura, el rozamiento con el suelo es poco significativo, y puede ser una buena aproximación a considerar que hay equilibrio entre las Fuerzas de Coriolis y las de Presión, de manera que las trayectorias serían las líneas isobaras de presión constante. Este viento se suele conocer con el nombre de viento geostrofico [1].

En zonas próximas a la superficie del suelo, el rozamiento con el mismo adquiere más importancia y la dirección de la velocidad adquiere una componente en la dirección de mayor a menor presión. Por otro lado a una escala local, más pequeña, puede haber muchos otros factores que influyen considerablemente en el viento, unos de los más importantes son los obstáculos y configuraciones orográficas, que dan lugar a efectos aceleradores, por ejemplo en las colinas, que son de mucho interés para el aprovechamiento de la energía eólica.

Los meteorólogos suelen denominar a las tres escalas anteriores del movimiento atmosférico como *macro-escala*, *meso-escala* y *micro-escala*, respectivamente. La macro-escala típica es de unos 1000 km. y es la que se puede observar en un mapa del tiempo como el de la Figura 1.

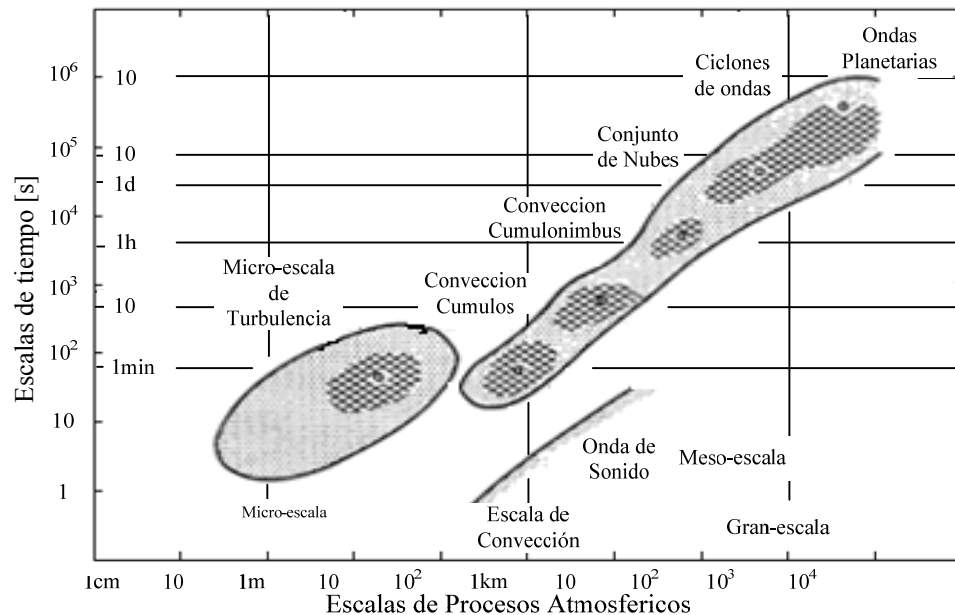


Figura 1. Escalas Características de Tiempo para Procesos Atmosféricos [1]

La meso-escala es de unos 10 a 500 km. y corresponde por ejemplo a las brisas marinas, o a los vientos asociados a cordilleras o valles. La micro-escala se refiere al tamaño de la perturbación debida a obstáculos tales como colinas o montículos, o hasta las mismas estelas de las aeroturbinas que crean la turbulencia [1].

Los procesos atmosféricos son generalmente observados sobre un amplio espectro, que van desde el flujo de micro turbulencia a ondas planetarias Figura 1, dando una idea de las características de la escala de tiempo y de la escala de longitud de diferentes tipos de procesos atmosféricos. Se puede decir que los procesos de micro turbulencia tienen una escala de longitud característica de 1m, cumulus de convección 1km, proceso de meso-escala (como grupo de nubes tropicales) en 100km y perturbaciones sinópticas de 1000km a 10000km [2].

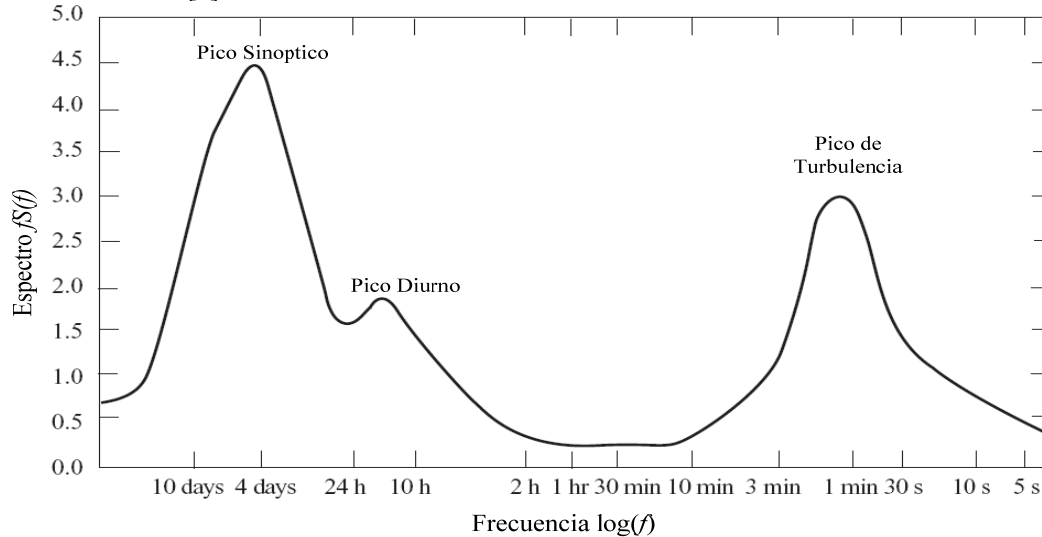


Figura 2. Espectro de Velocidad Horizontal del Viento Trazado por Van Der Hoven (1957) [3]

Además en la Figura 2 muestra como la *energía es distribuida espectralmente* cerca de la superficie. El espectro mostrado es el espectro clásico de una turbina de viento de eje horizontal dado por van der Hoven (1957). El espectro $S(f)$ tiene un máximo en alta frecuencia ($f \sim 50 \text{ horas}^{-1}$) que es correspondiente para flujos de micro turbulencia de escalas de longitud de 1m a 100m ($f = 1/\tau$, donde f es la frecuencia y τ es el período de oscilación, $S(f)$ es la densidad espectral).

Otro máximo es encontrado para muy largos períodos ($\tau = 4$ días) que reflejan disturbios sinópticos. Un tercer máximo más débil aparece en un período de $\tau = 12 \text{ h}$ que es de las oscilaciones diurnas. También se observa un ancho intervalo de pequeños valores alrededor de un período de $\tau = 30 \text{ min}$ correspondiente con una escala de longitud de $L = 10 \text{ km}$ ($L = u\tau$). Las escalas mas pequeñas se resuelven en un modelo de previsión donde se tiene ($L \sim 100 \text{ km}$) cayendo dentro del intervalo espectral, así que la región espectral alrededor del primer máximo de energía pertenece completamente a la sub-escala de red. Para modelos de previsión el intervalo espectral de grandes escalas de disturbios es de gran interés. Ha habido muchos esfuerzos en el pasado para derivar la distribución espectral de la energía cinética desde observaciones de datos, la mayoría recientemente por Chen y Gin-Nielsen (1978). Las investigaciones muestran que la energía cinética sigue con detalle una ley de potencia tres para un gran número de señales. La ley de la potencia de tres es debida al carácter bidimensional de los flujos de gran escala. Por otra parte el flujo tridimensional isotropico el cual es típico de procesos de turbulencia de pequeña escala que muestran una distribución con potencia de $-5/3$. Ambas distribuciones son validas para sub-rangos inerciales de los espectros. Donde la energía cinética es simplemente transferida desde una gran escala hasta pequeñas escalas de disipación. Lo expresado anteriormente resulta ser de gran importancia para tener una mejor comprensión en el trabajo desarrollado [2].

Las turbinas de viento producen continuas y complejas fluctuaciones de potencia. La fuente principal de dicha fluctuación de potencia en las turbinas de viento convencionales es la variación de la velocidad del viento.

A fin de investigar las características operativas de un sistema de conversión de energía del viento es frecuentemente deseable tener un registro secuencial de velocidades del viento. Algunas veces los datos reales suficientes en cantidad y calidad no están disponibles a tiempo para el análisis necesario. En tales casos, frecuentemente es posible hacer uso de las características estadísticas de los datos de velocidad de

viento para calibrar modelos estocásticos y entonces generar una serie de tiempo de velocidad de tiempo simulado.

Lo anterior justifica la necesidad de efectuar el desarrollo de un modelo para la velocidad del viento adecuado para evaluar el desempeño de los sistemas eólicos (ver Figura 3).

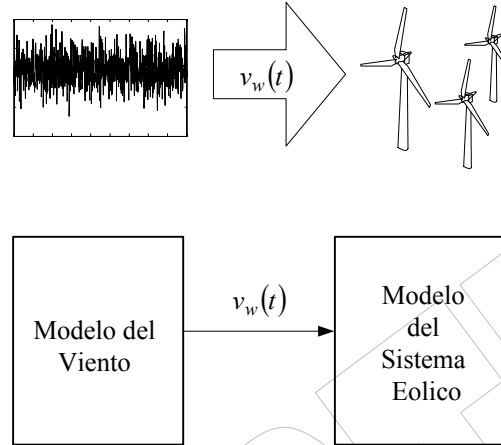


Figura 3. Contexto del Uso del Modelado de la velocidad del viento

En este reporte se presenta los resultados de una investigación, que está enfocada en la elaboración de un programa que permite obtener la simulación de la velocidad viento en función del tiempo $v_w(t)$.

Para consideraciones de la modelación de la magnitud de la velocidad del viento en el tiempo, se ha decidido considerar tres tipos de comportamientos, en función del tipo de datos o modelo a emplear:

- Velocidad Constante:** Este caso trata de considerar la magnitud de la velocidad del viento constante durante el período de tiempo en consideración. Se busca representar y considerar que la variabilidad del viento es muy pequeña o no representativa durante el período de tiempo en consideración. este valor es el promedio de diferentes velocidades medidas en el tiempo (Figura 4(a)).
- Serie de Tiempo:** En ocasiones se dispone de mediciones reales de la velocidad del viento en un determinado sitio y durante un lapso de tiempo, si se desea evaluar el desempeño del sistema de conversión de energía del viento, es prudente que se emplee datos en la forma de una serie de tiempo. De igual modo, en ocasiones resulta de interés emplear una característica muy particular de la velocidad de viento para evaluar el desempeño de un sistema eólico siendo pertinente el uso de una serie de tiempo que permite configurar punto a punto la sucesión de valores de velocidad en la que se examina el desempeño del sistema. En este caso se considera el viento en forma discreta en el tiempo, siendo caracterizado por un par ordenado de la forma $(v_w(t_j), t_j)$, que está definida para el período de tiempo en consideración.
- Modelo Estocástico para Pequeñas o Grandes Escalas de Tiempo:** En la literatura hay reportado una cantidad apreciable de métodos y técnicas para efectuar la modelación de la velocidad del viento, existiendo aproximaciones para tiempos que se encuentran en el orden de minutos y segundos (pequeñas escalas) y otros que van desde horas e inclusive hasta días (grandes escalas). Estas aproximaciones se basan en construir una serie de componentes individuales que finalmente se combinan, y donde cada una de las componentes recoge los fenómenos dominantes en su respectiva escala de tiempo. Resultado de estos modelos se crea una serie de tiempo constituida por pares ordenados de la forma $(v_w(t_j), t_j)$ que está definida para el período de tiempo en consideración.

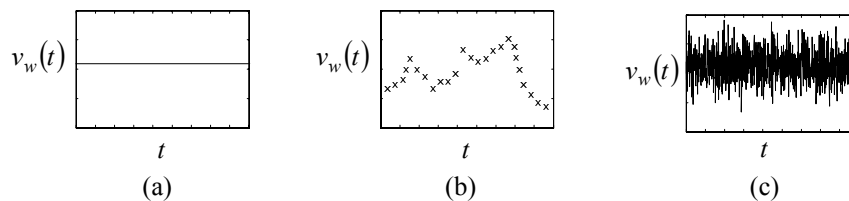


Figura 4. Tipos de Comportamientos a Modelar (a) velocidad constante (b) serie de tiempo, (c) aproximación numérica

A fin de proveer y generar una serie de tiempo de velocidad de viento que pueda ser empleado para simular el comportamiento de sistemas de conversión de energía del viento se ha desarrollado un programa computacional denominado: *Simulador del Comportamiento de la Velocidad del Viento*, cuyas siglas son *SimComp2V*, versión 1.00.

SimComp2V fue desarrollado como un archivo ejecutable en Mathworks MATLABTM, el cual toma los datos necesarios desde una hoja de calculo en Microsoft ExcelTM, y genera una serie de tiempo para el periodo de tiempo considerado y que es entregada en una hoja de calculo en Microsoft ExcelTM.

Datos:

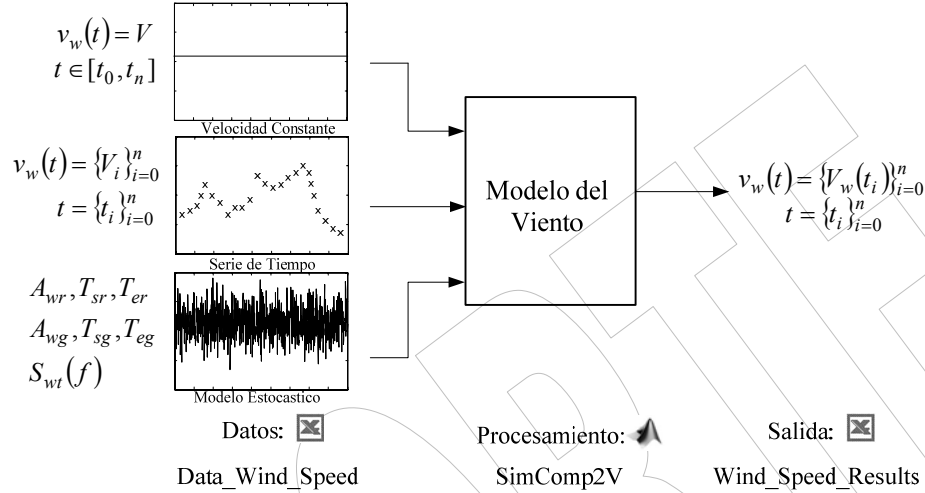


Figura 5. Esquema General del Programa Simulador de Comportamiento de la Velocidad del Viento. *SimComp2V*, versión 1.00

El programa de simulación del comportamiento de la velocidad del viento entrega una serie de tiempo, constituido por pares ordenados de la forma:

$$\begin{aligned} v_w(t) &= \{V_w(t_i)\}_{i=1}^n \\ t &= \{t_i\}_{i=1}^n \end{aligned} \quad (1)$$

Donde se ha considerado que el tiempo es discretizado a un paso de tiempo Δt , tal que:

$$\Delta t = \frac{t_n - t_o}{n} \quad (2)$$

Siendo n es el número de subintervalos considerador, para la discretización.

1.1. Modelo: Velocidad Constante

En algunas aplicaciones, se requiere evaluar el desempeño del sistema de conversión de energía del viento ante la consideración de una velocidad de viento constante, o que posee una variación pequeña durante el período de tiempo en consideración.

Típicamente cuando se efectúa la modelación del tiempo a velocidad constante, es para un período de tiempo corto, donde se suele considerar el valor igual al correspondiente al valor medio de la velocidad durante el período apropiado. La ventana espectral de la consideración de éste modelo puede estar entre 10 minutos y 5 horas.

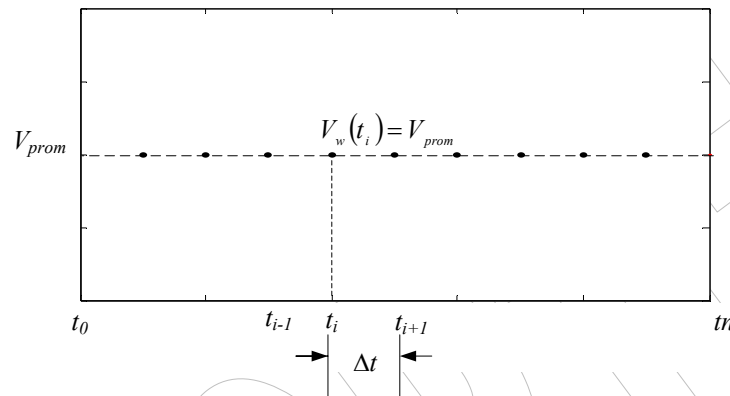


Figura 6. Representación Grafica de la Serie de Tiempo de Velocidad del Viento, modelado a Velocidad Constante

En el intervalo considerado $t \in [t_0, t_n]$, cada punto de tiempo discretizado t_i , para n puntos queda dado por:

$$t_i = t_0 + i\Delta t \quad \text{para } i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Donde el paso de tiempo de discretización viene dado por la ecuación (2). En cada punto de tiempo, la velocidad del viento es mantenida constante e igual al promedio durante el lapso considerado; siendo:

$$v_w(t) = \{V_w(t_i) = V_{prom}\}_{i=1}^n \quad \text{para } t = \{t_i\}_{i=1}^n \quad (4)$$

La representación grafica del modelado de la velocidad de viento constante es mostrada en la Figura 6.

1.2. Modelo: Serie de Tiempo

En algunas ocasiones se desea investigar las características operativas de un sistema de conversión de energía del viento a partir de un registro secuencial de velocidades del viento, y en otras situaciones, se desea la evaluación del sistema para un régimen de viento específico. En ambos casos el uso de una serie de tiempo es posible.

Estas series de tiempo de la velocidad del viento, vienen en la forma de una sucesión de puntos en forma de pares ordenados:

$$\begin{aligned} v_w &= \{V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}, \dots, V_{wn}\} \\ t &= \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\} \end{aligned} \quad (5)$$

En vez de aplicar una función aproximante para modelar el viento es posible la aplicación de series de tiempos de mediciones o registros de la velocidad del viento que puede ser representado por medio de tablas. Este tipo de modelado a la hora de simular resulta ser más incomodo, debido a que implica introducir los datos correspondiente, considerando que cada valor debe estar en las unidades que exige el programa. Se debe acotar que existe dos clases de tiempos, uno es el tiempo de muestra que es donde se

realizan las mediciones tabuladas, y el otro es el tiempo de simulación, para el cual se hace o requiere la modelación del viento mediante el programa elaborado.

En las series el valor instantáneo de la velocidad del viento $v_w(t)$, es especificado para cada instante de tiempo (t_i). La representación de la velocidad del viento en cada instante es representado por un par ordenado ($v_w(t_i)$, t_i) el cual es almacenado en forma de una matriz de dos vectores.

Esta serie de tiempo es acotada, en donde $i = 1, \dots, n$, y n representa el numero de mediciones que se registran o se muestran, y que define el tiempo total de la serie t_n .

En aquellos casos, donde la cantidad y frecuencia de los datos aportados en la serie de tiempo $v_w = \{V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}, \dots, V_{wn}\}$, no son consistentes con el paso y tiempo de integración; se deben efectuar manipulaciones matemáticas para obtener puntos dentro de la serie existente (no se realiza pronósticos de velocidad de viento, es decir, si t_n menor al tiempo de simulación no se puede efectuar una extrapolación o pronostico de la serie)

Un adecuado método de interpolación debe ser aplicado entre los pares ordenados de la matriz $v_w - t$. La ventaja de la representación por tabla es que es simple de entender y explicar y que la adecuada precisión puede ser alcanzada simplemente por la selección de la adecuada resolución de la matriz. La desventaja es igualmente obvia: las tablas y de tal modo la cantidad de datos necesarios puede ser mas substancial. Los datos utilizados en la representación por tablas son obtenidos por mediciones reales realizadas en distintos lugares donde se requiera realizar una investigación o implementación de cualquier proyecto.

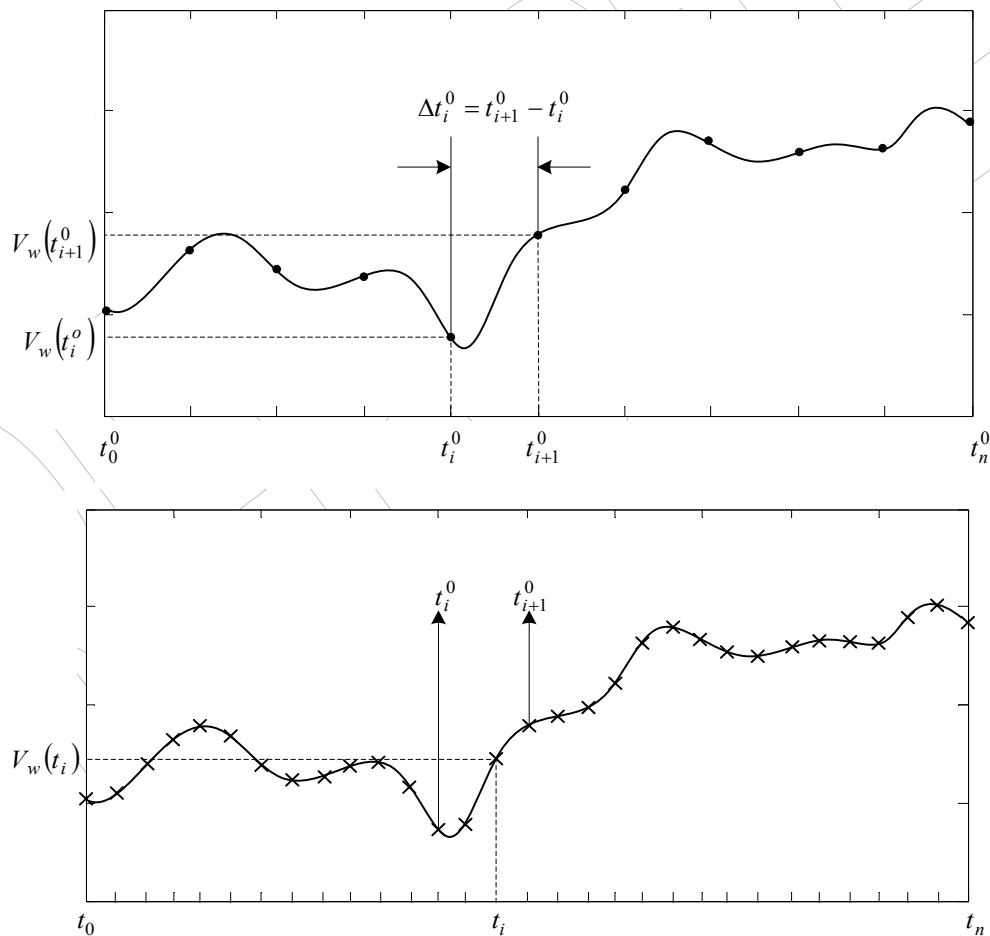


Figura 7. Representación de un punto que esta dentro de un intervalo proporcionado por la tabla

En la Figura 7 se pueden observar dos ejes diferentes de tiempo, uno se refiere al *tiempo de la simulación* (t_i) y el otro a la *serie de tiempo que se desea simular* (t_i^0). Para aquellos valores donde el tiempo tabulado coincide con el de simulación ($t_i^0 = t_i$) no se requiere aplicar ninguna herramienta matemática para conocer el valor de la velocidad ya que es el mismo ($V_w(t_i^0) = V_w(t_i)$), si se presenta la

situación donde no coinciden y se encuentren dentro del intervalo $[t_o, t_n]$ se debe realizar una aproximación mediante la interpolación, donde el paso viene dado por la ecuación (2). Para el caso de las simulaciones en MatlabTM se representaron mediante una interpolación escogida por el usuario, y la cual puede ser cúbica o lineal.

1.3 Modelo Estocástico del Viento

A continuación se describen los métodos para cortos y grandes tiempos de simulación de la velocidad del viento, se llama a tiempos pequeños de simulación para la velocidad del viento a aquellos que se encuentran en el orden de los segundos, y grandes tiempos a todos aquellos que van desde minutos, horas e inclusive días. Las componentes de la velocidad del viento solo se consideran para las escalas de tiempo pequeñas ya que en estos es donde se logra observar el verdadero efecto que tiene sobre el viento resultante.

1.3.1 Modelo: Para Pequeñas Escalas de Tiempo

La aproximación de la velocidad del viento mediante una secuencia de medidas, tiene como ventaja que una velocidad del viento real es usada para simular el desempeño de la turbina. La desventaja es que únicamente la secuencia de medidas dentro del intervalo de valores de velocidad del viento serán simuladas.

Una aproximación numérica es más flexible para realizar el modelado del viento, que puede generar secuencias de velocidades con características deseadas, situando el valor de los parámetros correspondientes para un valor apropiado. En la simulación del viento por aproximación numérica, es muy frecuente asumir que la velocidad del viento es hecha por la suma de cuatro componentes como se muestra [4], [5]:

- v_{wa} : valor promedio (*average*).
- $v_{wr}(t)$: Una componente de una rampa, representando un incremento continuo en la velocidad del viento.
- $v_{wg}(t)$: Una componente de la ráfaga, representando una ráfaga.
- $v_{wt}(t)$: Una componente representando turbulencia.

Finalmente la velocidad del viento es la combinación lineal de las cuatro componentes:

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (6)$$

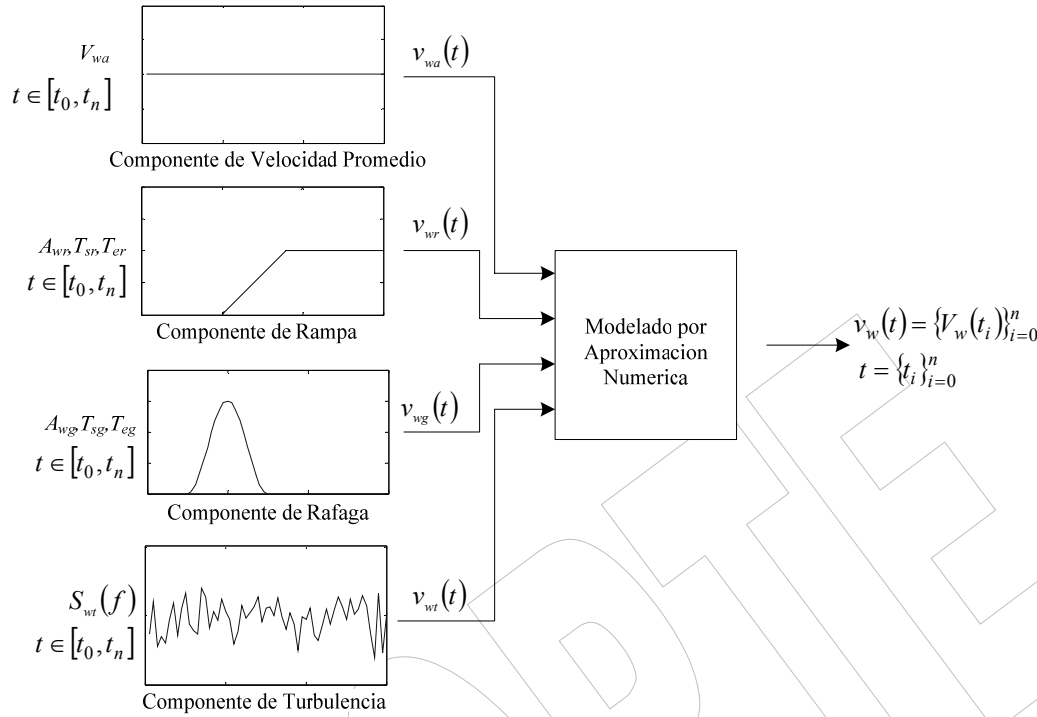


Figura 8. Diagrama de Ilustrativo de las componentes que influyen en el modelado por aproximación numérica de la Velocidad del Viento

Para la simulación del viento por aproximación numérica se requiere de ciertos datos que son introducidos por el usuario y otros que son calculados a partir de los ya conocidos.

A continuación se definen cada uno de los componentes que forman parte de la aproximación numérica del viento.

1.3.1.1 Componente de Velocidad Promedio

El valor promedio de la velocidad del viento v_{wa} , corresponde a la media matemática de la velocidad del viento registrada durante un cierto periodo de tiempo considerado. El valor promedio de la velocidad del viento v_{wa} , es calculada mediante la potencia generada (Para programas de aplicación en el análisis de sistemas de potencia este valor se puede obtener del calculo del flujo de potencia para una condición operativa dada) y la potencia nominal de la turbina.

En los programas para análisis de turbinas de viento integradas a sistemas de potencia el usuario no necesita especificar este valor. Una excepción es el caso turbina de viento con velocidad variable con control de ángulo de paso a potencia nominal. En este caso, esta no es la única relación que existe con la potencia generada, indicada en el análisis de flujo de potencia, y la velocidad del viento. Por consiguiente, el usuario debe dar un valor inicial de velocidad del viento o el ángulo de paso de la pala de la turbina. Las ecuaciones que describen al rotor, puede que se usen para calcular el ángulo de paso o el valor promedio de la velocidad de viento, respectivamente.

Se debe mencionar que la grafica de la componente promedio resulta muy similar a la grafica de la serie de tiempo de velocidad del viento constante, ya que esta resulta del valor promedio de un grupo de velocidades obtenidas en un intervalo de tiempo discretizado.

1.3.1.2 Componente Rampa de la Velocidad del Viento

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

Esta rampa de la velocidad del viento es caracterizada por tres parámetros, la amplitud de la rampa de velocidad del viento, $\hat{A}_r$ (m/s), el tiempo de comienzo o inicio de la rampa de la velocidad del viento T_{sr} (en segundos), y el tiempo final de la rampa de la velocidad del viento, T_{er} (en segundos).

La formulación matemática de la componente de rampa de la velocidad del viento es descrita en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} t < T_{sr} & \text{ para } v_{wr} = 0 \\ T_{sr} \leq t \leq T_{er} & \text{ para } v_{wr} = \hat{A}_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \\ T_{er} < t & \text{ para } v_{wr} = \hat{A}_r \end{aligned} \quad (7)$$

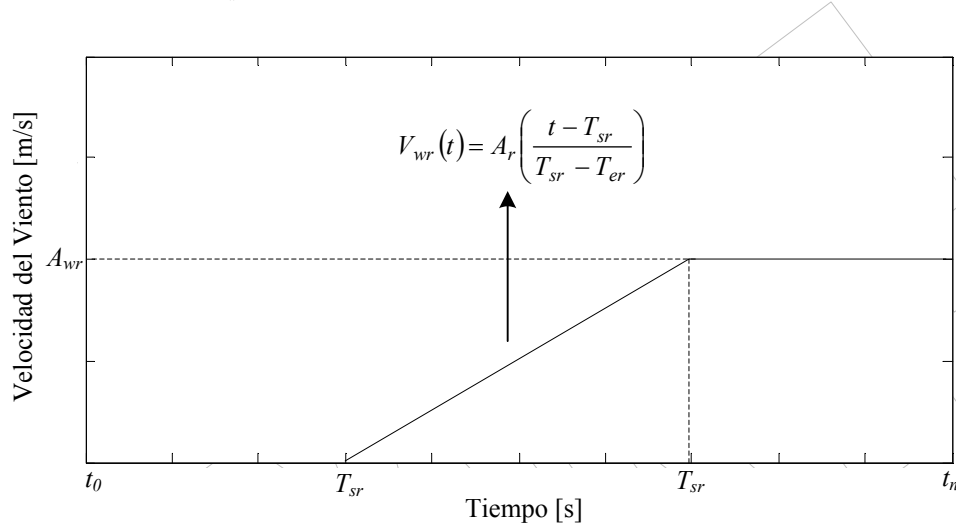


Figura 9. Grafica Ilustrativa Genérica de la Componente de Rampa para la Velocidad del Viento

La Figura 9 se muestra una grafica ilustrativa de la componente de rampa del viento donde se representa los tramos que definen la componente, observando los valores adquiridos $v_w(t_i)$, para cada instante de tiempo (t_i), y que obedece a la modelación matemática mostrada en la ecuación (7).

1.3.1.3. Componente Ráfaga de la Velocidad del Viento

Las ráfagas son indicadas por fluctuaciones rápidas en 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.

La ráfaga de velocidad de viento es caracterizada por tres parámetros, la amplitud de la ráfaga de la velocidad del viento, $\hat{A}_g$ (m/s), el tiempo comienzo o inicio de la ráfaga de la velocidad del viento T_{sg} (en segundos), y el tiempo final de la ráfaga, T_{eg} (en segundos).

La formulación matemática de la componente de ráfaga de la velocidad del viento es descrita en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} t < T_{sg} & \text{ para } v_{wg} = 0 \\ T_{sg} \leq t \leq T_{eg} & \text{ para } v_{wg} = \hat{A}_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}} \right) \right] \right\} \\ T_{eg} < t & \text{ para } v_{wg} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

En la Figura 10 se efectúa la representación grafica que ilustra el comportamiento genérico de la componente de ráfaga de viento. Mostrando que la ráfaga es un súbito cambio (ascenso-máximo-descenso) de la velocidad del viento, que sigue una forma de semiciclo positivo de una función coseno, donde el comienzo y el final de la ráfaga son completamente definidos.

Para la simulación de la componente de ráfaga del viento se emplea el modelo matemático mostrado en la ecuación (8).

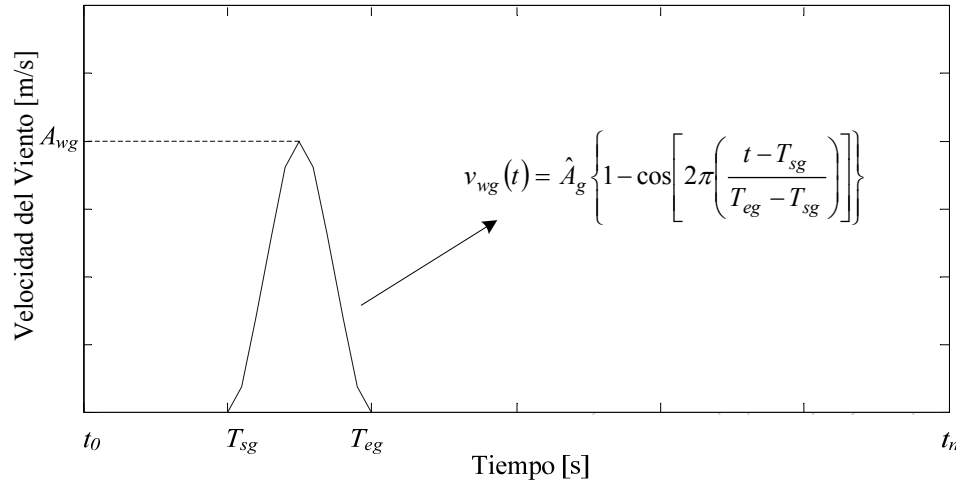


Figura 10. Grafica Ilustrativa Genérica de la Componente de Ráfaga para la Velocidad del Viento

1.3.1.4. Componente de Turbulencia de la Velocidad del Viento

La turbulencia del viento es una función sumamente compleja, debido a que ella involucra un comportamiento sumamente errático y aleatorio de la velocidad del viento lo que dificultan completamente la simulación matemática de esta componente.

El comportamiento de la componente de turbulencia del viento depende de varios factores como lo son: *origen de la turbulencia, intensidad, espectro*.

Los entendido en la simulación de la turbulencia del viento, por años han estudiado al fenómeno, y se han encontrado que el fenómeno posee distintas formas de cálculos los cuales son definidos en función al fenómeno a estudiar y el lugar donde se este llevando a cabo el estudio.

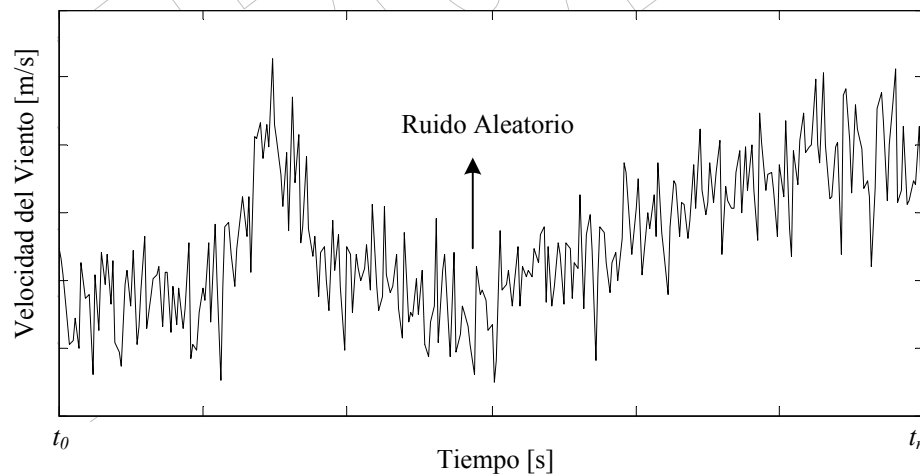


Figura 11. Grafica Ilustrativa de la señal de ruido aleatorio que proporciona la turbulencia

La Figura 11, muestra que la componente de turbulencia indica que esta componente inyecta un ruido aleatorio, esto es debido a las variables involucradas en la modelación matemática poseen el comportamiento de una variable aleatoria.

Para comprender la modelación de la componente de turbulencia del viento, se procede a estudiar de manera detallada: la *intensidad de la turbulencia*, el *espectro de turbulencia* y las *escalas de longitud*.

1.3.1.4.1. Intensidad de Turbulencia

La *intensidad de turbulencia* en la atmósfera neutral claramente depende de la *rugosidad de la superficie*. Para la componente longitudinal, la desviación estándar es σ_u , y la cual es aproximadamente constante con la altura 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, con la velocidad de fricción u^* . El más reciente trabajo (ESDU, 1985) [6], hace pensar en una variación dada por [3]:

$$\sigma_u = \frac{7.5\eta \left(0.538 + 0.09 \ln \left(\frac{h}{z_o} \right) \right) p u^*}{1 + 0.156 \ln \left(\frac{u^*}{f z_o} \right)} \quad (9)$$

Donde:

$$\eta = 1 - \frac{6fh}{u^*} \quad (10)$$

$$p = \eta^{16} \quad (11)$$

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

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (12)$$

La intensidad lateral (v) y vertical (ω) de turbulencia son dadas (ESDU, 1985)

$$I_v = \frac{\sigma_v}{U} = I_u \left(1 - 0.22 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2z} \right) \right) \quad (13)$$

$$I_\omega = \frac{\sigma_\omega}{U} = I_u \left(1 - 0.45 \cos^4 \left(\frac{\pi h}{2z} \right) \right) \quad (14)$$

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

Intensidad de Turbulencia Normalizada

A fin de homologar criterios en el cálculo de la intensidad de la turbulencia, algunos cuerpos de normalización, ha decidido adoptar metodologías consideradas estandarizadas para homologar los cálculos en el diseño, construcción y evaluación del desempeño de turbinas de viento.

La Asociación Ingenieros y la Federación de Ingenieros de Dinamarca (*The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers*) en 1992 estableció un código para la practica de las cargas y la seguridad en la construcción de la turbinas de viento [7]. Este código es reconocido como el *Danish standard* DS472, 1992 especifica la intensidad de turbulencia en todas las direcciones:

$$I_u = \frac{1}{\ln \left(\frac{h}{z_o} \right)} \quad \text{Intensidad de Turbulencia Longitudinal} \quad (15)$$

$$I_v = 0.8 I_u \quad \text{Intensidad de Turbulencia Lateral}$$

$$I_\omega = 0.5 I_u \quad \text{Intensidad de Turbulencia Vertical}$$

Por su parte el *International Electrotechnical Commission* (IEC), estableció en 1999 una estandarización para los requerimientos de seguridad de los sistemas de generadores con turbinas de viento, siendo de manera específica el estándar 61400-1 [8].

La Tabla 1 da los valores de Z_o para varios tipos de paisajes que rodeen a la turbina de viento.

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

Tipo de Ambiente	Rango de Z_o (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

$$I_u = I_{15} \left(\frac{a + \frac{15}{U}}{a + 1} \right) \quad \text{Intensidad de Turbulencia Longitudinal} \quad (16)$$

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

Si se considera un modelo isotrópico, la intensidad de la turbulencia cumple con: $I_u = I_v = I_w$.

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 diferentes 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). En la Figura 12 muestran 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 de altura con longitud de rugosidad de 0.3 y 00.3m respectivamente.

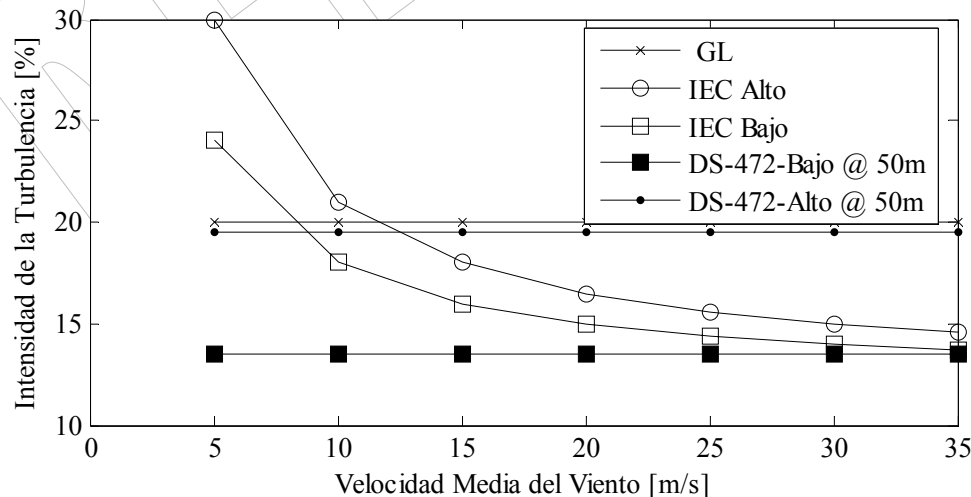


Figura 12. Intensidad de turbulencia para varios estándares [5]

1.3.1.4.2. 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 que decae las turbulencias de Eddies a más altas frecuencias tal que las frecuencias turbulentas de energías disipadas en calor.

Dos expresiones alternativas para el espectro de la componente longitudinal de turbulencia son comúnmente usadas, ambas tendencias al límite asintótico. Esas son el *espectro de Kaimal* y el *espectro de von Karman*, que dicen [3]:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{1u}/\bar{U}}{(1 + 6nL_{1u}/\bar{U})^{5/3}} \quad \text{Espectro Kaimal} \quad (17)$$

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4nL_{2u}/\bar{U}}{\left(1 + 70.8 \left(\frac{nL_{2u}}{\bar{U}}\right)^2\right)^{5/6}} \quad \text{Espectro von Karman} \quad (18)$$

Donde $S_u(n)$ es la función de la *densidad autoespectral* para la componente longitudinal, L_{1u} y L_{2u} son escalas de longitud.

A fin para estas dos formas poseen el mismo límite asintótica de alta frecuencia, esas escalas de longitud deben ser relacionadas con el radio $(36/70.8)^{5/4}$, $L_{1u} = 2.329L_{2u}$.

Conforme Petersen [12], el espectro de von Karman da 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.

El espectro de von Karman es a menudo usado por las consistencias con las expresiones analíticas. La longitud de escala L_{2u} es identificada como la integral de longitud de escala de la componente longitudinal en la dirección longitudinal, denotado xL_u .

El espectro de Kaimal tiene un más bajo y ancho pico que el espectro de von Karman.

1.3.1.4.3. Escalas de Longitud y Otros Parámetros

Las *escalas de longitud* son dependientes de la rugosidad de la superficie z_0 , como también la altura sobre la tierra (h); la proximidad a la tierra restringe el tamaño de 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 donde la altura efectiva de la superficie de la tierra es $h = 2.5z_0$. Bastante lejos sobre la tierra, para $h > h_i$, la turbulencia no es restringida mas por a proximidad a la superficie y se transforma en isotropica.

De acuerdo ESDU [13], $z_i = 1000z_0^{0.18}$ y anteriormente 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 isotropica es la altura de una turbina de viento y la corrección para $h < h_i$ debe ser aplicada:

$$\begin{aligned} ^xL_u &= 280 \left(\frac{h}{z_i} \right)^{0.35} \\ ^yL_u &= 140 \left(\frac{h}{z_i} \right)^{0.38} \\ ^zL_u &= 140 \left(\frac{h}{z_i} \right)^{0.45} \end{aligned} \quad (19)$$

$${}^xL_v = 140 \left(\frac{h}{z_i} \right)^{0.48}$$

$${}^zL_v = 140 \left(\frac{h}{z_i} \right)^{0.55}$$

Junto con ${}^xL_\omega = {}^yL_\omega = 0.35z$ (para $h < 400m$). Las expresiones para yL_v y ${}^zL_\omega$ no son dadas. Las escalas de longitud xL_u , xL_v y ${}^xL_\omega$ puede ser usado directamente en el espectro de von Karman. Para este el espectro de Kaimal ya se tiene $L_{1u} = 2.329{}^xL_u$, y para lograr la misma asíntota de la alta frecuencia para la otra componente también se tiene $L_{1v} = 3.2054{}^xL_v$, $L_{1\omega} = 3.2054{}^xL_\omega$.

El trabajo luego se baso en medidas para un gran rango de alturas [14], [12] 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 mas complicadas expresiones que las nuevas escalas de longitud en términos de h/z , σ_u/u^* y el número de Richardson $u^*/(fz_0)$.

Note que algunas de las normas usados para los cálculos de carga de la turbina del viento prescriben que ciertos espectros de la turbulencia y/o escalas de longitud son usadas. Estas a menudo son simplificadas comparadas con las expresiones dadas anteriormente.

Escala de Longitud Normalizada

El código para la práctica de las cargas y la seguridad en la construcción de la turbinas de viento [7] de *The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers* especifica el espectro de Kaimal como:

$$\begin{aligned} L_{1u} &= 150m, \text{ o } 5h \text{ para } h < 30m \\ L_{1v} &= 0.3L_{1u} \\ L_{1\omega} &= 0.1L_{1u} \end{aligned} \quad (20)$$

El *International Electrotechnical Commission* (IEC), en una estandarización para los requerimientos de seguridad de los sistemas de generadores con turbinas de viento (IEC 61400-1) recomienda un modelo de Kaimal:

$$\begin{aligned} L_{1u} &= 170.1m, \text{ o } 5.67h \text{ para } h < 30m \\ L_{1v} &= 0.3333L_{1u} \\ L_{1\omega} &= 0.08148L_{1u} \end{aligned} \quad (21)$$

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

$$\begin{aligned} {}^xL_u &= 73.5m, \text{ o } 2.45h \text{ para } h < 30m \\ {}^xL_v &= {}^xL_\omega = 0.5{}^xL_u \end{aligned} \quad (22)$$

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

$$L_i = 300 \left(\frac{h}{300} \right)^\varepsilon \quad (23)$$

Para $h < 300m$, con ε variando entre 0.13 sobre aguas abiertas, 0.46 en áreas urbanas, este estándar es usado para edificios, pero no usualmente para turbinas de viento.

A fin de mostrar las diferencias que imponen las diferentes normas en la longitud de escala se procedió a efectuar el trazado de los espectros de turbulencia longitudinal normalizados: Karman, Kaimal, Danish Estándar y Eurocode, para diferentes frecuencias. En la Figura 13 se diversos espectros de turbulencia longitudinal para 30m de altura, para una velocidad media de 10 m/s.

La rugosidad de la superficie es 0.001m, correspondiendo a tierra muy plana o el mar, una latitud de 500, esto es razonable entre los varios espectros de esta situación, aparte de el espectro de Eurocode que cambia las mas bajas frecuencias.

Es importante evidenciar las 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 mas alta. Por su parte, se muestra una semejanza en las curvas obtenidas entre Kaimal y *Danish Standard* Figura 13

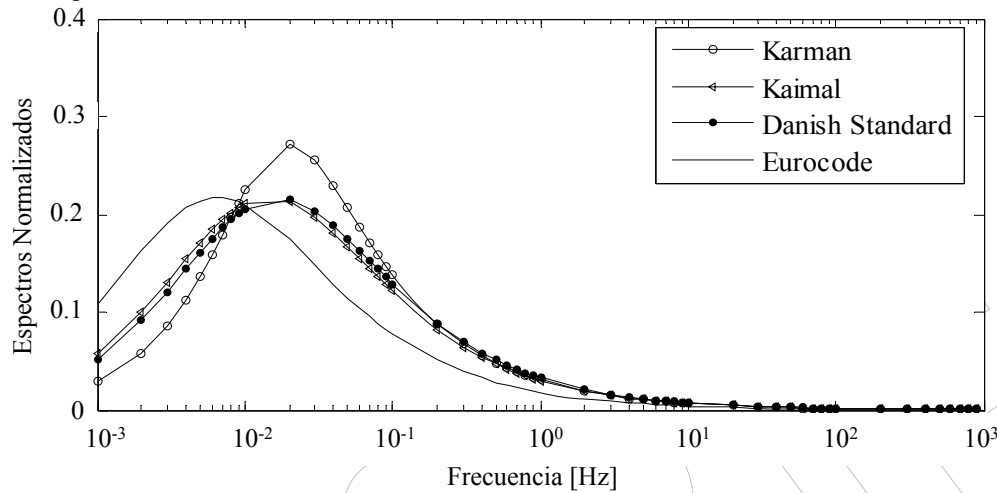


Figura 13. Comparación de Espectros de la Turbulencia Normalizados. Velocidad del viento 10m/s, rugosidad de 0.001m

Debido a la importancia que el espectro de turbulencia longitudinal posee sobre la simulación del viento, se efectúa una comparación más, y que es mostrada en la Figura 14. En este caso la longitud intermedia de rugosidad ha sido considerada de 0.001m, y se asume velocidad del viento de 25 m/s (mayor al empleado en la Figura 13).

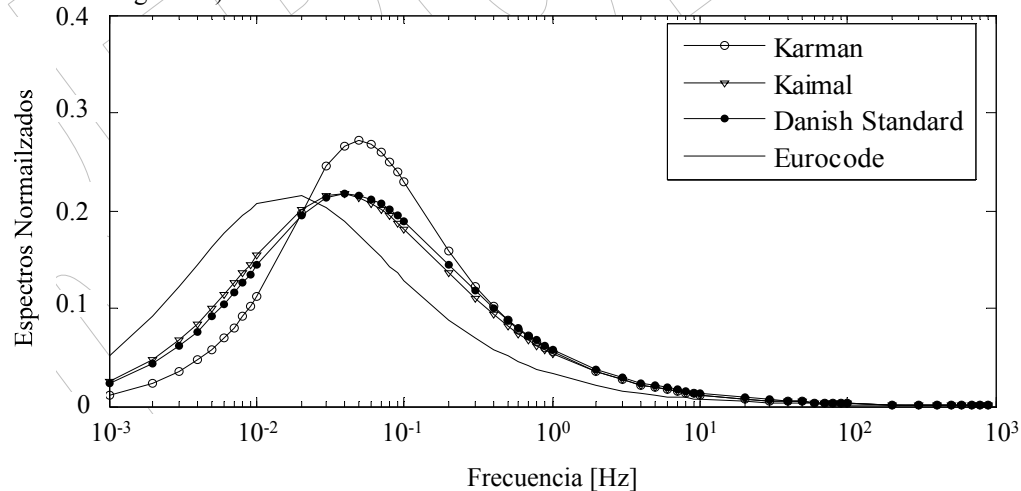


Figura 14. Comparación de Espectros de la Turbulencia Normalizados. Velocidad del viento 25m/s, rugosidad de 0.001m

En la Figura 14 se muestra que trazados de los espectros normalizados de turbulencia son desplazados a frecuencias mas altas y sus valores máximos son mayores que los logrados con la velocidad de viento menor (Figura 13). Se puede apreciar que además del desplazamiento hacia la derecha en el eje de frecuencia el *Danish Standard* y las *IEC* se encuentran a mas altas frecuencias que el modelo presentado por el *Eurocode*. Lo que indica que las *IEC* y el *Danish Standard* trabajan a altas frecuencia a medida que se aumenta la velocidad promedio.

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 *Danish Standard*.

La componente turbulenta de la velocidad del viento es caracterizada por la densidad del espectro de potencia $S_{wt}(f_i)$ [5], que queda definida por:

$$S_{wt}(f_i) = \frac{1}{\left(\ln(h/z_o)\right)^2} l v_{wa} \frac{1}{\left(1 + 1.5 \frac{f_i l}{v_{wa}}\right)^{5/3}} \quad (24)$$

A continuación se muestra la ecuación que refleja esto:

$$P_{Dt}(f) = l v_{wa} \left[\ln\left(\frac{h}{z_o}\right) \right]^{-2} \left[1 + 1.5 \frac{f l}{v_{wa}} \right]^{-5/3} \quad (25)$$

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). A través del parámetro Z_o , se toma entre los cálculos la independencia de la intensidad de turbulencia sobre el paisaje donde la turbina de viento es localizada. 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 tiempos para valores de velocidad del viento con una densidad de espectro de potencia según la ecuación (28) para ser aplicado en la simulación.

Un método para generar una serie de tiempo de una densidad potencia espectral dada es necesario. Este método es basado en la suma de un gran número de funciones senoidales de frecuencias diferentes y amplitud, 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 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, el ángulo de fase de cada una de las componentes de la frecuencia. En el método aplicado, esto 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 [5]. Así, una cantidad infinita de serie 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^{th} .

$$v_{wt}(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_{wt}(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \phi_i + \Delta\phi) \quad (26)$$

Δf debe escogerse entre 0.1 y 0.3 Hz y n igual a 50 [16]. El término $\Delta\phi$ en la ecuación (26), 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 (26) en un proceso del cuasiestacionario [17].

Los factores de PSDSs son llevados fuera del dominio del tiempo, considerando que la turbulencia del viento es descrita por la densidad del espectro de potencia dado el dominio de la frecuencia, aumenta el problema específico: la traslación de la densidad del espectro de potencia dentro de la secuencia de tiempo de valores que da la densidad del espectro de potencia. Para solucionar este problema se usa el siguiente método que trabaja de la siguiente manera

La densidad de un espectro de potencia puede usarse para derivar información acerca de la amplitud de la señal con una frecuencia dada, entonces, un gran número de senos con un ángulo de la fase inicial aleatorio y una amplitud calculada de la densidad del espectro de potencia agregados a cada tiempo de paso. Así se puede generar una señal en el dominio del tiempo con la frecuencia de la densidad del espectro de potencia que es un simple equivalente de la densidad del espectro de potencia original. La más pequeña diferencia entre las frecuencias de las componentes, el buen espectro de la densidad de potencia de la señal generada artificialmente es parecida a la densidad del espectro de potencia general. El tiempo requerido en los cómputos puede aumentarse, aunque, para más información de los métodos que se usan para generar señales en el tiempo del dominio con una densidad del espectro de potencia dado.

1.3.2. Modelado 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 frecuencia 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]

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S_{vv}(\omega_i) + S_{vv}(\omega_{i+1})] [\omega_{i+1} - \omega_i]} \quad (27)$$

y una fase, φ_i que es generada al azar con una distribución uniforme en el dominio $[-\pi, \pi]$ [16].

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

$$v_w(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (28)$$

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 ($T=2\pi/\omega_i$). Dado un N para la muestra de operación característica de van der Hoven y se toman la siguiente variación de las frecuencias discretas:

$$f_i \leq i10^k \quad (29)$$

Donde i y k son valores numéricos de muestreo que se corresponden para lograr el valor de N [9].

Tomando en cuenta que [18]:

- Si existen grandes variaciones en la velocidad promedio del viento, el modelo de van der Hoven esta en la capacidad de caracterizar el comportamiento del viento para mediano y largo plazo.
- La turbulencia en modelo de van der Hoven tiene la misma magnitud sin tener en cuenta la velocidad promedio del viento.

Por consiguiente, 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. Sus propiedades no dependen de las variaciones del valor promedio, que son correspondientes al dominio de bajas frecuencias y tienen una escala de tiempo de horas, días, entre otros.

El modelo básico de la densidad de turbulencia viene dada por ecuación del espectro de von Karman (24), que para este caso se utiliza en función de la frecuencia angular discreta $S_{vv}(\omega_i)$ [16].

2. Implementación

Una vez descrita la modelación del viento se procede a realizar una breve descripción del programa *SimComp2V*, comenzando a hablar por la estructura de datos, donde para la entrada de los mismos se emplea hojas de calculo de Microsoft Excel™, debido a que esta permite la interacción con MATLAB.

Un archivo de Microsoft™ Excel™ consta de un libro que contiene una o más hojas. Una hoja contiene filas y columnas que se cruzan para formar celdas donde son almacenados los datos. Los datos pueden ser números o texto que pueden ser introducidos dentro de fórmulas que calculan valores basados en referencias a otros números del libro [19].

La forma aplicada para introducir los datos de entrada del sistema de potencia al programa *SimComp2V* se basa en la transcripción de la información requerida sobre el tipo de modelado que se desea analizar, para la ejecución de esto, el programa consta de archivos en Microsoft™ Office™ Excel™ con extensión .xls:

Data_Wind_Model

El archivo tiene una estructura diseñada de manera específica para que pueda ser usado por el programa *SimComp2V*, donde requiere de una estructura de datos con características particulares y sistemática, se puede observar distintos rubros o caracteres estructurados de acuerdo con ciertos criterios propios del programa y ordenados jerárquicamente por prioridad o requerimientos asociados con la programación del mismo. El archivo esta conformado por varias hojas, donde cada una desempeña un rol diferente en el momento que se lleva a cabo una simulación.

Seguidamente se observa una explicación del archivo *Data_Wind_Model*, donde se identifican los nombres de cada una de las hojas de cálculo que lo conforman así como sus respectivos campos.

- *Data_Case*
- *Data_Time_Series*
- *Data_Estocastic*

Estructura de Datos: Data_Case

En la estructura de datos que contiene los datos del caso a simular se encuentra la hoja cálculo *Data_Case*, la cual se presenta ocho (8) campos, como se muestra en la Figura 15.

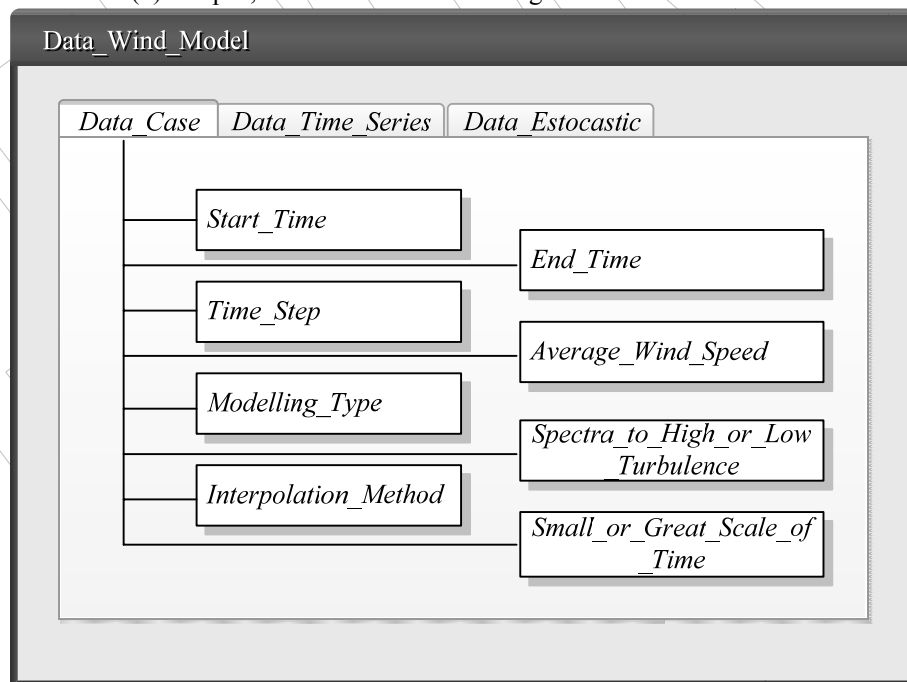


Figura 15. Modelo de Estructura de Datos de Caso

A continuación se presenta una breve explicación sobre los campos que contiene esta hoja de cálculo:

- *Start_Time*: Este campo indica el tiempo de inicio de la simulación.
- *End_Time*: Este campo indica el tiempo final de la simulación.

- *Time_Step*: En este campo se indica el paso a usar en la simulación.
- *Average_Wind_Speed*: En este campo se indica el valor promedio de la velocidad.
- *Modelling_Type*: Este campo indica el tipo de modelado que se requiera realizar, estos pueden ser: modelado del viento a velocidad constante, modelado del viento a través de una serie real discreta y modelado del viento por medio de una aproximación numérica

En la Tabla 2 se muestra el correspondiente valor numérico a ser incluido en la estructura de datos de entrada en función del modelo de simulación a ser considerado para la velocidad del viento.

Tabla 2. Tipos de Modelado del Viento

<i>Tipo de Modelo (Modelling Type)</i>	<i>Valor</i>
Modelo del Viento a Velocidad Constante	1.00
Modelo del Viento a través de una serie de tiempo	2.00
Modelo Estocastico	3.00

- *Spectra_Turbulence*: En este campo se indica si el espectro a usar es para baja o alta intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia depende de las condiciones ambientales que se tengan. En la tabla 3, se muestra los indicadores numéricos a ser incluido en este campo para efectuar los correspondientes modelados en régimen de turbulencias del viento.

Tabla 3. Tipos de Frecuencia para el Modelado del Viento

<i>Tipo de Frecuencia a utilizar (Spectra frequency)</i>	<i>Valor Numérico que lo representa</i>
Espectro de Alta Turbulencia	1.00
Espectro de Baja Turbulencia	2.00

Es importante mencionar que este valor ha de ser incluido en la base de datos de entrada si el tipo de modelado del viento incluido es *Modelling_Type=3*, en el caso de que no se escoja este tipo de modelado no es necesario indicar el valor correspondiente a este campo, ya que el programa no lo utiliza para la simulación y resulta inútil que este sea cargado dentro del mismo.

Small_or_Great_Scale_of_Time: En este campo se indica las escalas de tiempo que se van a simular, esta puede ser para grandes o pequeñas.

En la siguiente tabla se puede observar la representación de las escalas de tiempo, acompañada del valor numérico que la identifica dentro del programa.

Tabla 4. Tipos de Escalas de Tiempo

<i>Tipo de escala a utilizar</i>	<i>Valor</i>
<i>Great_Scale_of_Time</i>	1.00
<i>Small_Scale_of_Time</i>	2.00

- *Interpolation_method*: En este campo se indica el tipo de interpolación a usar en la simulación del viento, esta es usada para la modelación que viene dada por una serie de tiempo real discreta. En el diseño del programa se usaron dos tipos de interpolaciones como son la cúbica y lineal.

En la tabla siguiente se indica el campo usado en este caso y el valor que lo define a la hora de realizar la simulación del viento

Tabla 5. Tipo de Interpolación que usa SimCop2V

<i>Tipo de Interpolación (Interpolation method)</i>	<i>Valor</i>
Cúbica	1.00
Lineal	2.00

Nota: el valor correspondiente al campo que trata el tipo de interpolación es necesario si y solo si se ha escogido el modelado del tiempo haciendo uso de una serie de tiempo

Estructura de Datos: Data_Time_Series

En esta estructura de datos se tiene la información que contiene al viento y tiempo respectivamente, es esta hoja se encuentran los valores del viento alojados en forma de pares ordenados $[t_i, v(t_i)]$ que se requieran simular, estos pertenecen al caso de modelado del viento por medio de una serie de tiempo real discreta, vale la pena mencionar que esta hoja de calculo es útil mientras se escoja este caso en específico, ya que los demás no requieren el uso de la misma. En la Figura 16 muestra una representación que contiene a esta estructura de datos para el modelado del viento a través de series de tiempo.

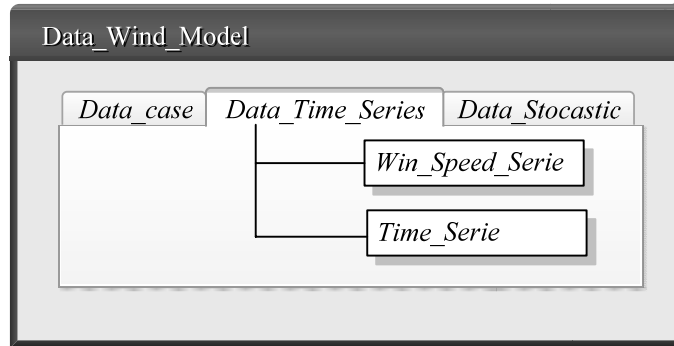


Figura 16. Modelo de Estructura de Datos de la Velocidad del Viento

Los datos de la serie de tiempo de la velocidad del tiempo son introducidos por medio de un conjunto de pares ordenados, de la forma $v_w(t) = \{V_w(t_i) = V_{prom}\}_{i=1}^n$ para $t = \{t_i\}_{i=1}^n$. En la estructura de datos los valores numéricos son introducidos en dos columnas:

- *Time_Serie*: En este campo se indica la serie de tiempo que se desea simular.
- *Wind_speed_Serie*: En este campo se indica el valor de la velocidad del viento correspondiente a la serie de tiempo que se desea simular.

Estructura de Datos: Data_Stochastic

En esta estructura de datos se contiene los parámetros necesarios para realizar la simulación correspondiente a considerar la velocidad del viento por su modelo estocástico; siendo necesario nueve parámetros, como se muestra en la Figura 17. A continuación se presenta una simple explicación de los campos necesarios para el estudio de este caso.

- *Hub_Height*: Este campo indica la altura que tiene el eje de la turbina sobre el nivel del suelo. El valor de este viene dado en metros [m].
- *Longitude_of_Ruggedness*: En este campo se indica el valor que tiene el parámetro como longitud de rugosidad, el mismo viene expresado en metros [m].
- *Const E de Eurocode*: Este campo indica el medio ambiental en el cual se encuentra la turbina, para así escoger la longitud de rugosidad pertinente.
- *T_Beginning_of_the_ramp*: En este campo se indica el valor de tiempo de inicio de la componente de rampa que forma parte de la velocidad del viento.
- *T_End_of_the_ramp*: Este campo contiene el valor del tiempo final de la componente de rampa.
- *T_Beginning_of_the_gust*: En este campo se indica el valor de tiempo de inicio de la componente de ráfaga que forma parte de la velocidad del viento.
- *T_End_of_the_gust*: Este campo contiene el valor del tiempo final de la componente de ráfaga.
- *Amplitude_of_ramp*: En este campo se indica el valor de la amplitud de la componente de rampa.
- *Amplitude_of_gust*: En este campo se indica el valor de la amplitud de la componente de ráfaga.

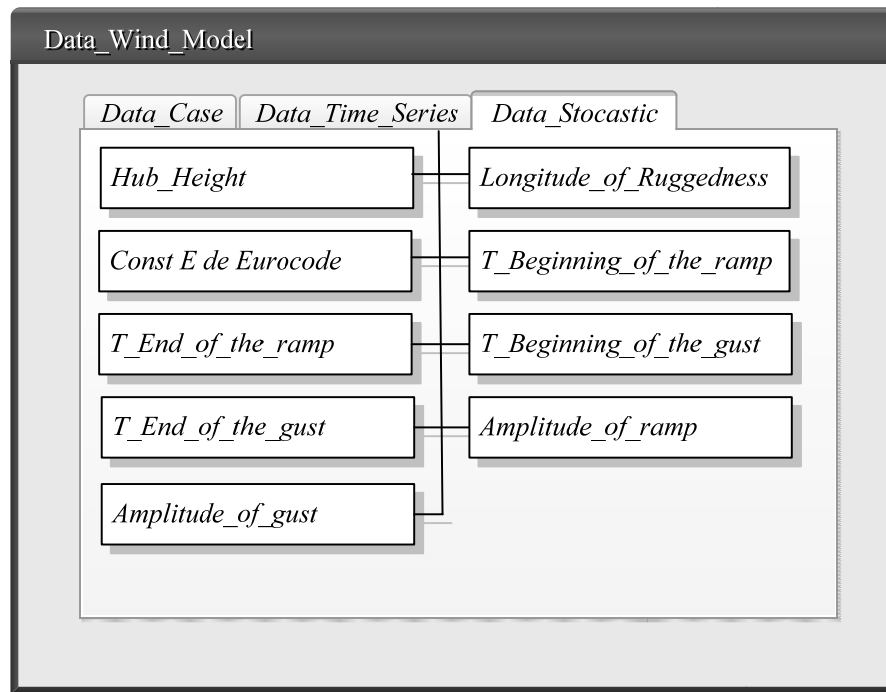


Figura 17. Modelo de Estructura de Datos para el Modelo Estocástico

Proceso

Unas de las partes más importantes en cualquier programa de simulación es la etapa de procesamiento de los datos para obtener la información, en este se ejecutan una serie de pasos en secuencia única. Luego de introducir los datos conforme al archivo de entrada y conformada la respectiva estructura de datos se efectúa el proceso de tratamiento, en donde haciendo uso de ciertos procedimientos lógicos y sistemáticos para lograr mediante la modelación matemática empleada, se obtenga la velocidad del viento.

El proceso dentro del programa *SimComp2V*, es efectuado por medio de una secuencia de comandos escritos en un archivo script en lengua de Mathworks MATLAB™, el cual lee los datos necesarios desde una hoja de calculo en Microsoft Excel™. Antes de la ejecución de los procesos asociados al programa se requiere que el usuario introduzca todos los datos asociados al caso a simular, incluyendo todos los parámetros necesarios para el modelo seleccionado de la velocidad del viento.

El programa procesa mediante modelos matemáticos los datos y genera una serie de tiempo para la velocidad del viento para el periodo de tiempo considerado. Los resultados de la simulación de comportamiento del viento son entregados por el programa en la forma de una serie de tiempo, de la velocidad del tiempo y que es almacenada en una hoja de calculo en Microsoft Excel™.

En la Figura 18 se muestra una representación general de flujo de datos e información del programa *SimComp2V*, mientras que en la Figura 20 se hace referencia a un diagrama de flujo referencial de las operaciones efectuadas en la modelación de la velocidad del viento en el programa.

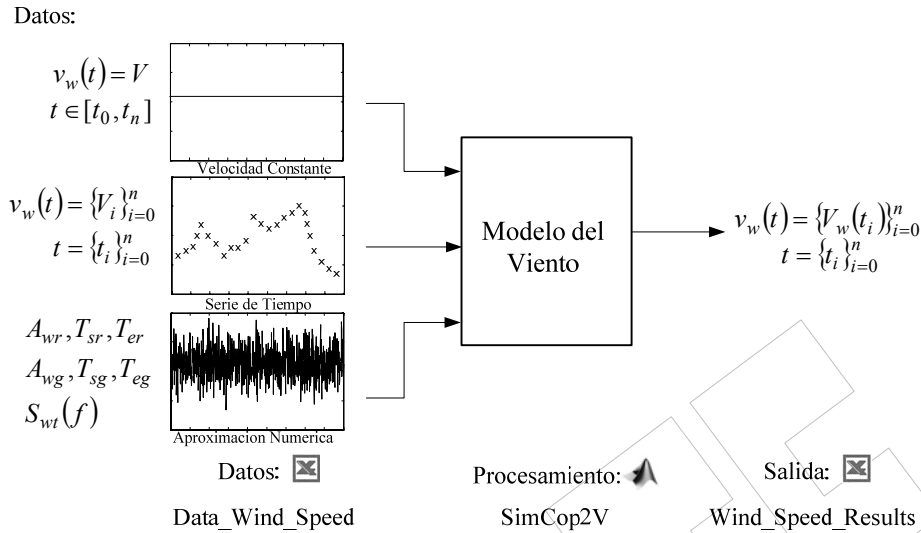


Figura 18. Esquema General del Programa Simulador de Comportamiento de la Velocidad del Viento SimComp2V, versión 1.00

Salida

Concluido el procesamiento de los datos y la modelación matemático de la velocidad del viento, el programa precede a almacenar los resultados de la simulación en una hoja de cálculo de Microsoft Excel que lleva como nombre *Wind_Speed_Results.xls*. La cual esta constituida por una estructura de datos, en la forma de un conjunto de pares ordenados para valores de velocidad del viento y su respectivo tiempo $[t_i, v(t_i)]$. (Ver Figura 19).

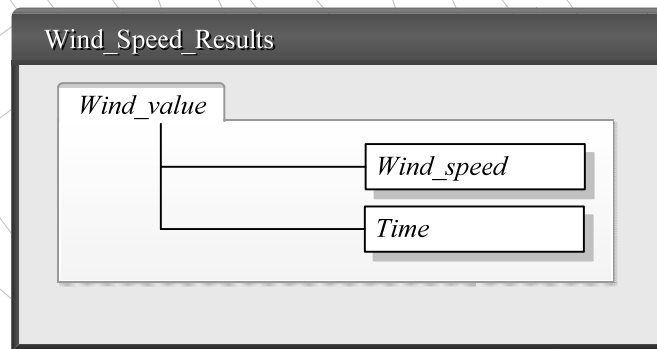


Figura19. Modelo de Estructura de Datos de los Resultados

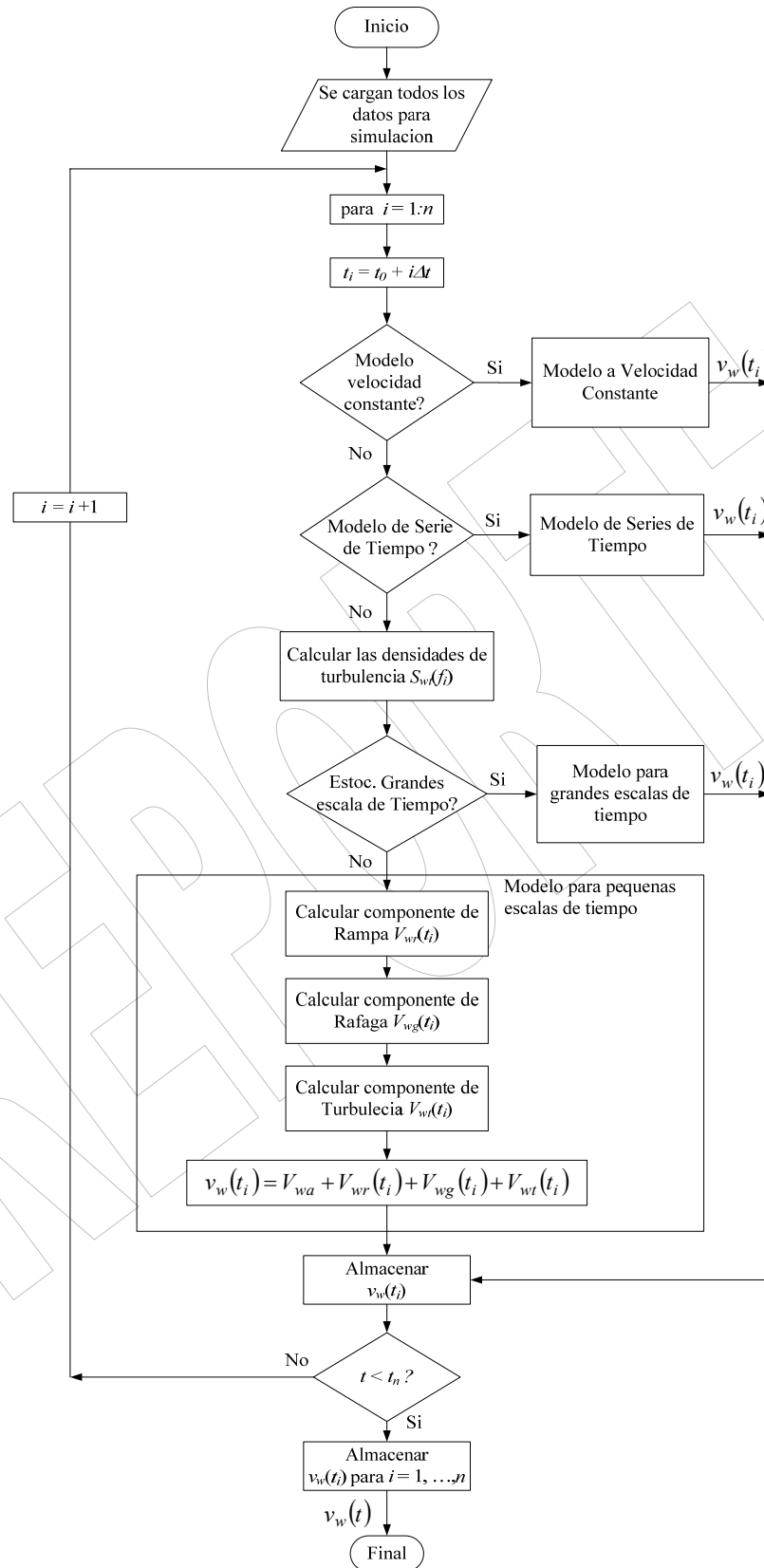


Figura 20. Diagrama de flujo para los Tipos de Modelados del Viento

3. Resultados

A fin de establecer la validez y el correcto funcionamiento del programa diseñado para la simulación del viento *SimComp2V*, se procedió a efectuar una serie de simulaciones, cuyos resultados son comparados con resultados reconocidos, que se consideran como patrón.

Se han tomado como patrón de comparación los resultados publicados en textos o artículos donde se desarrolla la modelación del viento.

A objeto de efectuar una validación completa del programa *SimComp2V*, se han efectuado simulaciones de la velocidad del viento considerando:

- *Caso 1: Modelación del viento a velocidad constante.*
- *Caso 2: Modelación del viento a través de una serie de tiempo real discreta.*
- *Caso 3: Modelación del viento para pequeñas escalas de tiempo.*
- *Caso 4: Modelación del viento para grandes escalas de tiempo.*

3.1. Caso 1: Modelación del Viento a Velocidad Constante

Para validar el modelo del viento a velocidad constante del programa *SimComp2V*, se ha supuesto que se quiere simular una velocidad constante del viento. De tal modo, se desea que el programa genere una serie de tiempo equivalente a este valor.

En tal sentido el archivo *Data_Wind_Model.xls*, se configuro para que el modelo a emplear fuese el de velocidad constante, para esto se requiere la configuración de distintos parámetros que permiten que se lleve a cabo la simulación, en la Figura 15 se tienen los campos pertenecientes a *Data Case*, donde algunos de estos se deben indicar obligatoriamente para poder simular el caso que se desea, entre los parámetros que se deben señalar se tiene el tipo o caso de modelado que se requiere simular (*Modelling Type*), además de este campo se debe señalar el paso (*Time Step*), como también el tiempo inicial (*Start Time*) y final (*End Time*) de la simulación, entre otros. Esto se puede observar claramente en la Figura 15, aquí se indican todos los campos pertenecientes a la estructura de datos del caso.

Para la simulación realizada se utilizo un valor promedio de la velocidad del viento $V_{avg} = 11.5$ m/s, para ello, se considero que la serie de tiempo de velocidades de viento $v_w(t)$ que tiene una duración de $t_n = 60$ seg, y la cual es entregada a valores discretos con un paso de tiempo $\Delta t = 1$ seg. En la Tabla 6 se presenta los valores considerados para los parámetros de simulación del viento a velocidad constante de acuerdo a la configuración que se tiene en la estructura de datos *Data_Case* perteneciente al archivo *Data_Wind_Model.xls*

Tabla 6. Configuración de *SimComp2V* para el Caso 1: Velocidad Constante

<i>Modelling Type</i>	1.00
<i>Start Time</i>	0.00 s
<i>End Time</i>	60.00 s
<i>Time Step</i>	1.00 s
<i>Average Wind Speed</i>	11.50 m/s

En las Figura 21 se muestra una reproducción de los dialogo en pantalla durante la ejecución del programa *SimComp2V*, en Matlab.

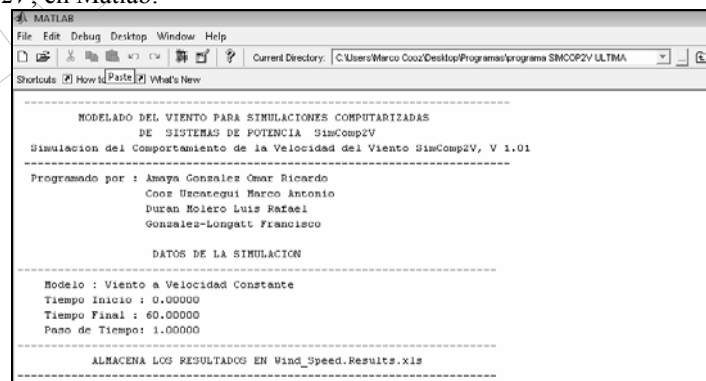


Figura 21. Pantallas de Dialogo durante la Ejecución del Programa *SimComp2V*

Una vez efectuada la simulación del viento a velocidad constante, se construyó la gráfica de los resultados lo cual es mostrado en la Figura 22.

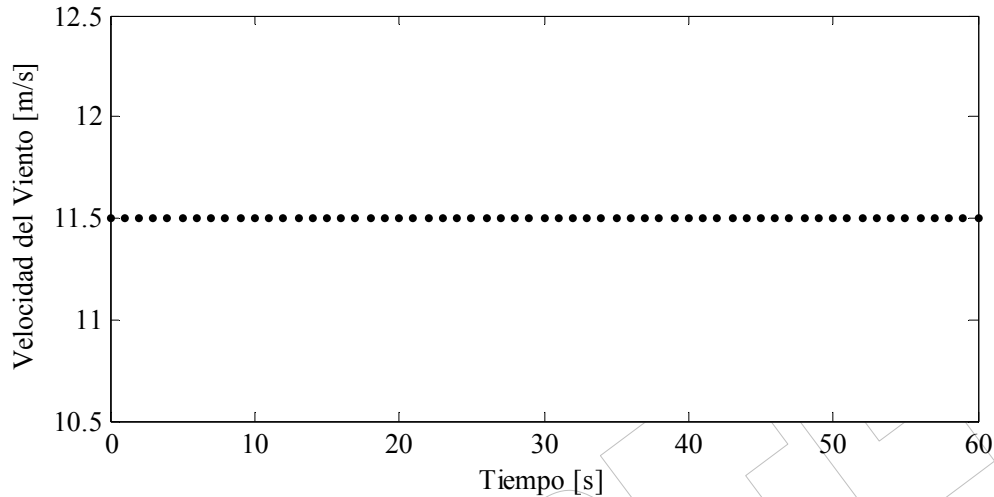


Figura 22 Velocidad del Viento Constante para Variaciones del Tiempo

En este caso se observa una sucesión de puntos que indican un valor constante de velocidad del viento de 11.5 m/s, con una duración de 60 segundos. A la serie de tiempo para velocidad de viento $v_w(t)$, $t \in [t_0, t_n]$, obtenido por el programa *SimComp2V*, se le calculó el valor medio, empleando la definición de valor medio [20]:

$$F_{avg} = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_n} f(t) dt \quad ()$$

donde τ es el período de la función $f(t)$. Efectuado el cálculo del valor promedio de la serie de tiempo de la velocidad del viento se tiene $V_{avg} = 11.5$ m/s, con lo que se verifica la validez de los resultados alcanzados con el programa desarrollado.

3.2. Caso 2: Modelación del Viento a través de una Serie de Tiempo

Para validar el modelo del viento mediante una serie de tiempo aportada de mediciones en el programa *SimComp2V*, se han tomado los datos aportados en forma de pares de velocidad de viento y tiempo.

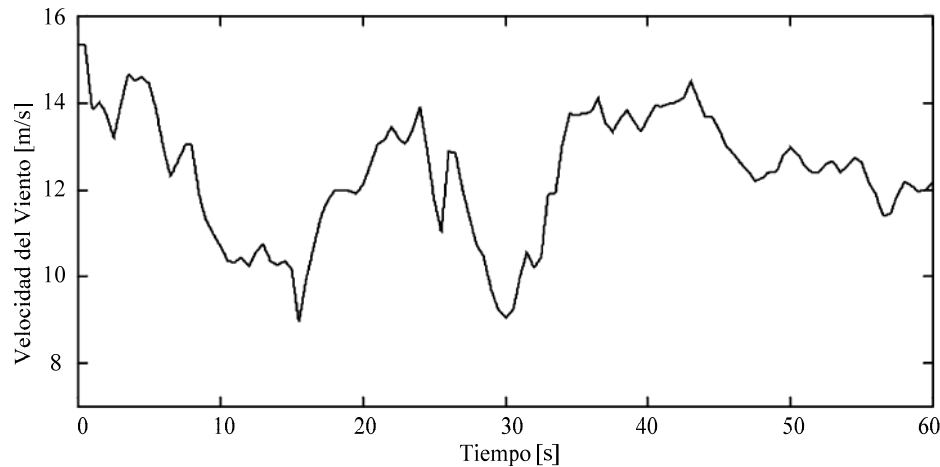
Previo a la ejecución de *SimComp2V* se introdujo los datos de la serie de tiempo mostrada en la Tabla 7, obtenida de [4], junto con los parámetros de simulación a ser alcanzados, todos ellos en el archivo *Data_Wind_Model.xls*, dentro de la hoja de cálculo *Data_Time_Series*.

Para ilustrar las bondades de ajuste para requerimientos de interpolación, cuando la serie de tiempo a simular, debe tener una frecuencia de muestreo menor a la original considerando métodos de interpolación elegidos por los autores, recalando que se pueden usar otras aproximaciones de orden superior.

Tabla 7. Datos para la Simulación del Caso 2 obtenidos en [4]

Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]
15.45	0.00	8.77	15.95	10.42	32.17	13.33	46.20
13.99	0.83	10.09	16.50	10.16	33.00	12.87	47.00
14.13	1.65	11.08	17.32	11.88	33.82	12.40	47.85
13.25	2.48	11.94	18.15	11.88	34.00	12.14	48.67
14.75	3.30	11.94	18.97	12.47	34.65	12.34	49.50
14.65	4.13	11.90	19.80	13.72	35.47	12.35	49.77
14.71	4.95	12.14	20.62	13.75	35.80	12.47	50.20
13.46	5.77	13.00	21.45	13.79	36.30	12.87	51.15
12.32	6.60	13.06	21.90	13.82	36.90	12.67	51.97
12.80	7.42	13.39	22.27	14.12	37.12	12.40	52.80
13.18	8.25	13.06	23.10	13.66	37.95	12.40	53.62
13.18	8.70	13.33	23.92	13.20	38.77	12.61	54.45
11.45	9.07	13.86	24.75	13.79	39.60	12.27	55.27
10.78	9.90	11.68	25.57	13.23	40.42	12.60	56.10
10.23	10.72	10.95	26.40	13.72	41.25	12.07	56.92
10.42	11.55	12.87	27.22	13.86	42.07	11.35	57.10
10.16	12.37	11.48	28.05	13.99	42.90	12.25	58.30
10.69	13.20	10.42	28.87	14.38	43.72	12.00	59.40
10.29	14.02	9.76	29.70	13.99	44.55	12.40	59.90
10.36	14.80	8.91	30.52	13.66	45.37	12.45	59.93
9.40	15.67	9.37	31.35	13.65	45.70	24.48	60.00

En la Figura 23 se presenta la grafica de la serie de tiempo para la velocidad del viento aportados en la Tabla 7; la misma es obtenida de [4].

**Figura 23. Velocidad del Viento obtenida en [4]**

3.2.1 Sin Interpolación

En la Figura 24 se presenta el resultado correspondiente a la simulación de la velocidad del viento mediante la utilización de la serie de tiempo obtenida en [4], esta serie se muestra en la Tabla 7. Los parámetros usados para ejecutar la simulación son totalmente iguales a los usados para la obtención de la curva patrón mostrada en la Figura 23, donde el tiempo para la simulación es igual a 60 s.

El resultado obtenido mediante la simulación es totalmente igual al establecido en la curva base o de comparación, esto se debe a que se usaron los mismos datos sin hacer uso de ninguna aproximación para reproducir la serie de tiempo ya establecida según la Tabla 7.

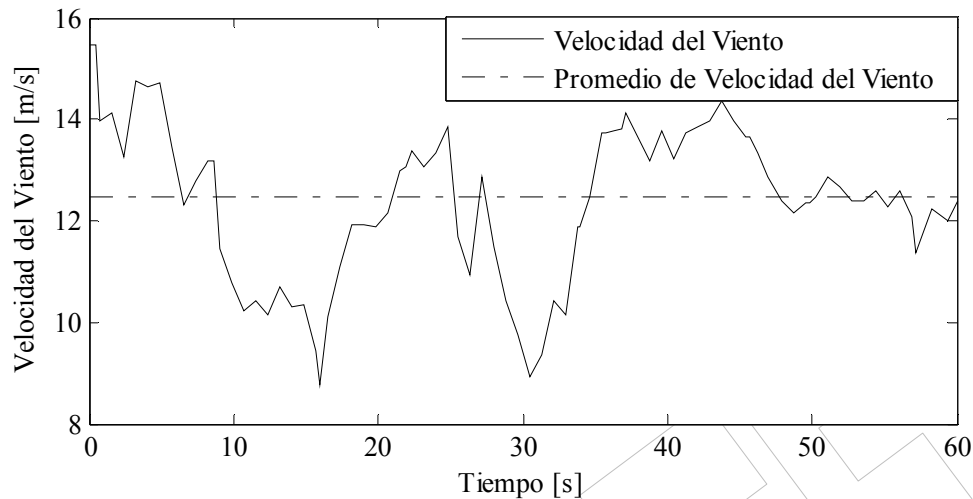


Figura 24. Serie de Tiempo de Registros de Velocidad de Viento obtenidos de [4], con velocidad promedio de 12.42 m/s

3.2.2 Interpolación Lineal

La Figura 25 representa los resultados obtenidos para la simulación del viento haciendo uso del programa computacional *SimComp2V* para el caso en estudio, recalcando que para el cálculo de todos aquellos valores de velocidad que no se encuentran en los datos tabulados se utilizó la interpolación lineal. La configuración del programa para la obtención de los resultados en este caso particular se encuentra en la tabla 8, todos estos parámetros se dan en el mismo lenguaje usado por el programa para transcribir la data de entrada. La configuración del programa se lleva a cabo dentro del archivo en Excel que se conoce como *Data_Wind_Model.xls*.

Tabla 8. Configuración de *SimCop2V* para el Caso 2 (Interpolación Lineal)

<i>Modelling Type</i>	2.00
<i>Start Time</i>	0.00 s
<i>End Time</i>	60.00s
<i>Time Step</i>	0.20 s
<i>Average Wind Speed</i>	11.50 m/s
<i>Interpolation method</i>	2.00

La Figura 25 representa los resultados obtenidos de la simulación correspondientes al modelado del viento usando la interpolación lineal.

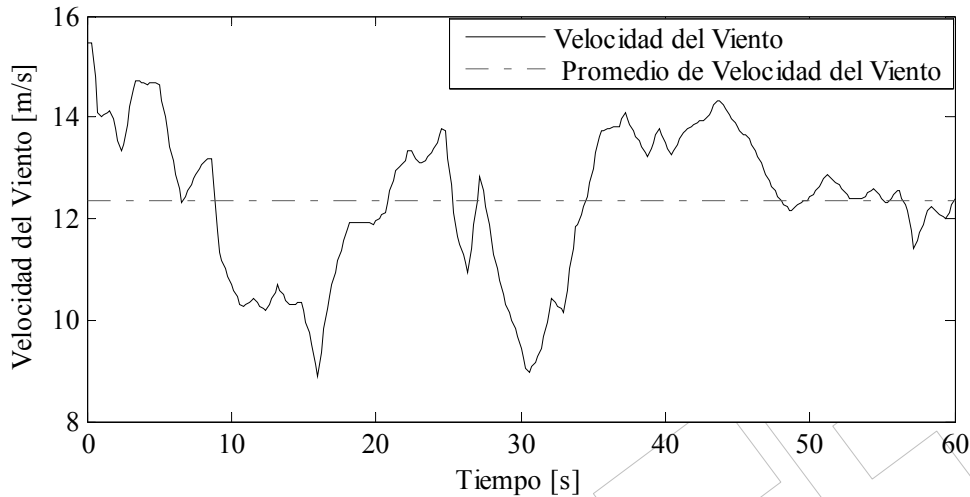


Figura 25. Serie de Tiempo de Registros de Velocidad de Viento obtenidos de [4] usando interpolación lineal, con velocidad promedio de 12.3566 m/s

La curva resultante de la simulación es comparada con la curva patrón obtenida en [4]. Observándose ambas curvas de manera muy detallada se han notado pequeñas discrepancias encontradas en los puntos máximos.

Los puntos máximos de la curva simulada son menos prolongados en comparación a los de la curva base, esto se debe a la aproximación que efectúa el programa diseñado por medio de la interpolación, esto se puede notar con mayor claridad observando la Figura 24 y 25 respectivamente, en el intervalo de tiempo comprendido entre 20 a 30s. Para que estos valores sean totalmente iguales en magnitud, deben coincidir el tiempo de simulación generado por medio del paso y el tiempo obtenido mediante los datos tabulados donde la velocidad del viento se hace máxima.

Obviando las pequeñas diferencias presentadas en la simulación se puede decir que la curva resultante es una buena aproximación a la curva teórica ya que posee un comportamiento igual en el transcurrir del tiempo de simulación.

3.2.3. Interpolación Cúbica

Para llevar a cabo la simulación en estudio, se requiere al igual que en los casos anteriores la configuración del programa, de tal manera que se obtengan el modelado del viento a través de una serie de tiempos discretizados haciendo uso de la interpolación cúbica. Todos los parámetros que se requieren para dicha simulación son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 9. Configuración de SimCop2V para el Caso 2 (Interpolación Cúbica)

<i>Modelling Type</i>	2.00
<i>Start Time</i>	0.00s
<i>End Time</i>	60.00 s
<i>Time Step</i>	0.20 s
<i>Average Wind Speed</i>	11.50 m/s
<i>Interpolation method</i>	1.00

Si se observa la configuración del programa para el caso anterior y el actual, se puede notar claramente que se tiene una sola diferencia en los campos, esto se debe a que uno pertenece al método de interpolación lineal y el otro a la interpolación cúbica como lo es el caso en estudio.

La Figura 26 muestra la simulación obtenida del caso en estudio. Esta presenta gran similitud e igualdad con las anteriores pertenecientes al mismo caso.

Es importante destacar que también se presentan pequeñas diferencias con respecto a la curva patrón, estas se pueden notar en las partes donde hay variaciones de la pendiente de la curva, así como también en los cambios de dirección encontrados en los puntos máximos de la señal. Estas discrepancias se deben

fundamentalmente al tipo de interpolación usada (cúbica). Obviando este margen de error presentado, se puede decir que ambas curvas resultan ser muy parecidas por lo que el resultado concuerda con lo esperado.

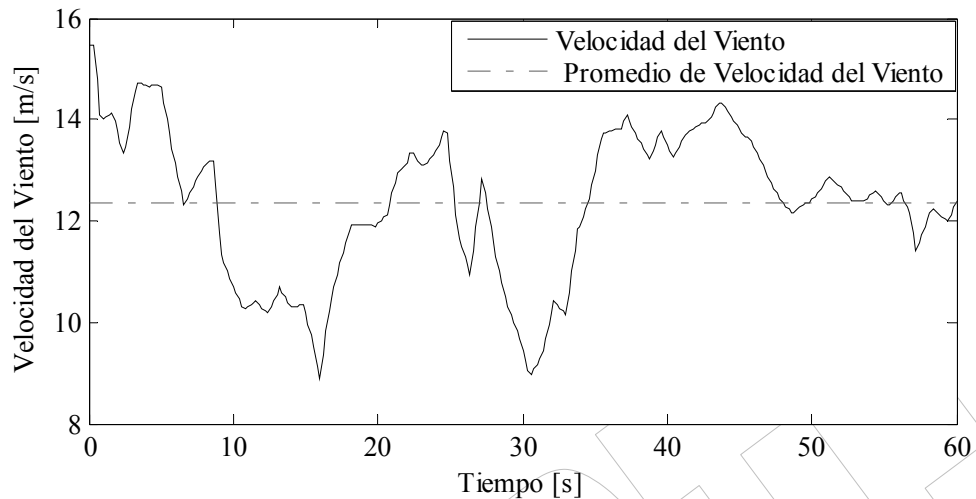


Figura 26. Serie de Tiempo de Registros de Velocidad de Viento obtenidos de [4] usando interpolación cúbica, con velocidad promedio de 12.3588 m/s

Luego de haber observado la simulación del viento a través de una serie de tiempo real discreta, se ha podido notar ciertas diferencias que dependen del tipo de simulación usada. El tipo de interpolación a usar en la simulación va a depender del comportamiento que tenga la curva que se quiera reproducir, cuando las variaciones de la función son proporcionales (o casi proporcionales) a los de la variable independiente se puede admitir que dicha función es lineal y para estimar los valores se recomienda usar la interpolación lineal, en el caso en que las variaciones no sean proporcionales se recomienda usar la interpolación de orden n , en el caso estudiado el valor de n es igual a tres, a esta interpolación se le conoce como cúbica.

Siempre van a existir diferencias entre la curva real y la aproximada, ya que se trata de obtener valores mediante el uso de una función matemática que se asemeje a la realidad, en el estudio realizado se ha podido notar las discrepancias causadas por el tipo de interpolación usada. Se puede decir que el método más aproximado a la curva real es el obtenido usando la interpolación cúbica debido a que se establecieron simulaciones para diferentes pasos de tiempo, donde se obtuvo que el valor de velocidad promedio de este tipo de interpolación (12,3588 m/s) se encuentra más cercano del valor promedio de la curva original (12,42 m/s) en comparación con el valor promedio de la interpolación lineal (12,3566 m/s).

Los resultados obtenidos en las simulaciones son cargados en un archivo de Excel denominado *Wind Speed Results*. Si se compara la hoja de resultados con la emitida en los datos se puede notar que existe mayor cantidad de puntos en la que muestra el resultado final, esto se debe a la generación de tiempos discretos que realiza la simulación, los puntos nuevos encontrados son resultado de la interpolación realizada para el caso en estudio.

TABLA 10. Resultados obtenidos en la Simulación del Viento para el Caso en Estudio

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad [m/s]
0.00	15.45	12.00	10.27	24.00	13.37	36.00	13.77	48.00	12.33
0.20	14.93	12.20	10.19	24.20	13.53	36.20	13.78	48.20	12.25
0.40	14.46	12.40	10.16	24.40	13.69	36.40	13.80	48.40	12.18
0.60	14.13	12.60	10.26	24.60	13.82	36.60	13.80	48.60	12.14
0.80	13.99	12.80	10.44	24.80	13.84	36.80	13.81	48.80	12.15
1.00	14.01	13.00	10.61	25.00	13.45	37.00	13.95	49.00	12.21
1.20	14.05	13.20	10.69	25.20	12.76	37.20	14.11	49.20	12.27
1.40	14.10	13.40	10.63	25.40	12.06	37.40	14.03	49.40	12.33
1.60	14.13	13.60	10.50	25.60	11.64	37.60	13.90	49.60	12.34
1.80	14.05	13.80	10.36	25.80	11.38	37.80	13.76	49.80	12.35
2.00	13.79	14.00	10.29	26.00	11.16	38.00	13.63	50.00	12.40
2.20	13.48	14.20	10.29	26.20	11.00	38.20	13.49	50.20	12.47
2.40	13.27	14.40	10.32	26.40	10.95	38.40	13.35	50.40	12.56
2.60	13.34	14.60	10.35	26.60	11.24	38.60	13.24	50.60	12.67
2.80	13.76	14.80	10.36	26.80	11.87	38.80	13.20	50.80	12.77
3.00	14.30	15.00	10.32	27.00	12.53	39.00	13.31	51.00	12.85
3.20	14.69	15.20	10.14	27.20	12.87	39.20	13.51	51.20	12.87
3.40	14.75	15.40	9.88	27.40	12.75	39.40	13.70	51.40	12.84
3.60	14.72	15.60	9.56	27.60	12.40	39.60	13.79	51.60	12.79
3.80	14.68	15.80	9.09	27.80	11.96	39.80	13.71	51.80	12.72
4.00	14.66	16.00	8.80	28.00	11.56	40.00	13.52	52.00	12.66
4.20	14.65	16.20	9.24	28.20	11.26	40.20	13.33	52.20	12.59
4.40	14.67	16.40	9.87	28.40	10.98	40.40	13.23	52.40	12.50
4.60	14.69	16.60	10.24	28.60	10.72	40.60	13.28	52.60	12.43
4.80	14.70	16.80	10.51	28.80	10.49	40.80	13.42	52.80	12.40
5.00	14.70	17.00	10.73	29.00	10.30	41.00	13.58	53.00	12.40
5.20	14.50	17.20	10.94	29.20	10.14	41.20	13.70	53.20	12.40
5.40	14.15	17.40	11.17	29.40	10.00	41.40	13.76	53.40	12.40
5.60	13.76	17.60	11.44	29.60	9.85	41.60	13.79	53.60	12.40
5.80	13.42	17.80	11.70	29.80	9.66	41.80	13.82	53.80	12.42
6.00	13.08	18.00	11.89	30.00	9.39	42.00	13.85	54.00	12.49
6.20	12.72	18.20	11.94	30.20	9.13	42.20	13.88	54.20	12.56
6.40	12.43	18.40	11.94	30.40	8.95	42.40	13.91	54.40	12.61
6.60	12.32	18.60	11.94	30.60	8.92	42.60	13.93	54.60	12.58
6.80	12.37	18.80	11.94	30.80	8.98	42.80	13.97	54.80	12.48
7.00	12.50	19.00	11.94	31.00	9.10	43.00	14.02	55.00	12.36
7.20	12.65	19.20	11.93	31.20	9.25	43.20	14.14	55.20	12.28
7.40	12.79	19.40	11.92	31.40	9.43	43.40	14.26	55.40	12.29
7.60	12.90	19.60	11.91	31.60	9.70	43.60	14.36	55.60	12.39
7.80	13.02	19.80	11.90	31.80	10.04	43.80	14.37	55.80	12.50
8.00	13.12	20.00	11.92	32.00	10.32	44.00	14.30	56.00	12.59
8.20	13.18	20.20	11.97	32.20	10.42	44.20	14.19	56.20	12.59
8.40	13.18	20.40	12.04	32.40	10.37	44.40	14.07	56.40	12.53
8.60	13.18	20.60	12.13	32.60	10.28	44.60	13.97	56.60	12.41
8.80	12.90	20.80	12.29	32.80	10.20	44.80	13.87	56.80	12.22
9.00	11.68	21.00	12.54	33.00	10.16	45.00	13.77	57.00	11.74
9.20	11.28	21.20	12.81	33.20	10.42	45.20	13.69	57.20	11.37
9.40	11.09	21.40	12.98	33.40	10.99	45.40	13.66	57.40	11.49
9.60	10.96	21.60	13.02	33.60	11.58	45.60	13.65	57.60	11.69
9.80	10.85	21.80	13.04	33.80	11.88	45.80	13.63	57.80	11.91
10.00	10.70	22.00	13.14	34.00	11.88	46.00	13.48	58.00	12.11
10.20	10.52	22.20	13.36	34.20	11.97	46.20	13.33	58.20	12.23
10.40	10.36	22.40	13.37	34.40	12.17	46.40	13.21	58.40	12.24
10.60	10.25	22.60	13.28	34.60	12.41	46.60	13.10	58.60	12.20
10.80	10.23	22.80	13.16	34.80	12.69	46.80	12.98	58.80	12.14
11.00	10.28	23.00	13.07	35.00	13.08	47.00	12.87	59.20	12.02
11.20	10.34	23.20	13.07	35.20	13.45	47.20	12.75	59.40	12.00
11.40	10.40	23.40	13.11	35.40	13.69	47.40	12.63	59.60	12.06
11.60	10.42	23.60	13.18	35.60	13.73	47.60	12.52	59.80	12.21
11.80	10.36	23.80	13.28	35.80	13.75	47.80	12.42	60.00	12.40

Si se conoce el comportamiento del viento que se desea simular, se recomienda escoger el tipo de interpolación a usar, si el viento posee un comportamiento constante se puede decir que la interpolación lineal es la mas adecuada, ya que los valores de viento que se obtengan se encuentran muy cercanos dentro de los valores reales, esto se debe a linealidad que presenta este método.

Si el viento se comporta de una forma no lineal se recomienda es uso de la interpolación cúbica, ya que los valores que se obtienen de este método se encuentran un poco mas cercanos a los valores reales, en este método se presenta un pequeño problema y es que no se observan los puntos máximos de una forma muy punteada.

3.3. Caso 3: Modelo Estocástico

Para validar el modelo del viento mediante un modelo estocástico en el programa *SimComp2V* se ha propuesto reproducir la curva de velocidad de viento aportada por [4], en la cual se consideran las componentes de velocidad promedio, rampa, ráfaga y turbulencia. Antes de proceder con la simulación se ha configurado el programa, definiendo los parámetros necesarios para obtener el resultado propuesto para este caso particular, como ya se ha dicho anteriormente estos parámetros se configuran dentro del archivo *Data_Wind_Models.xls*, y los valores de estos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Configuración de *SimCop2V* para el Caso 3

<i>Start Time</i>	0.00 s
<i>End Time</i>	60.00 s
<i>Time Step</i>	0.20 s
<i>Average Wind Speed</i>	11.50 m/s
<i>Modelling Type</i>	3.00
<i>Small or Great Scale of time</i>	2.00
<i>Hub Height</i>	30.00m
<i>T_Beginning of the gust</i>	10.00 s
<i>T_End of the gust</i>	20.00s
<i>T_Beginning of the ramp</i>	30.00 s
<i>T_end of the ramp</i>	50.00 s
<i>Amplitude of gust</i>	4.00 m/s
<i>Amplitude of ramp</i>	4.00 m/s

En la Figura 27 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.

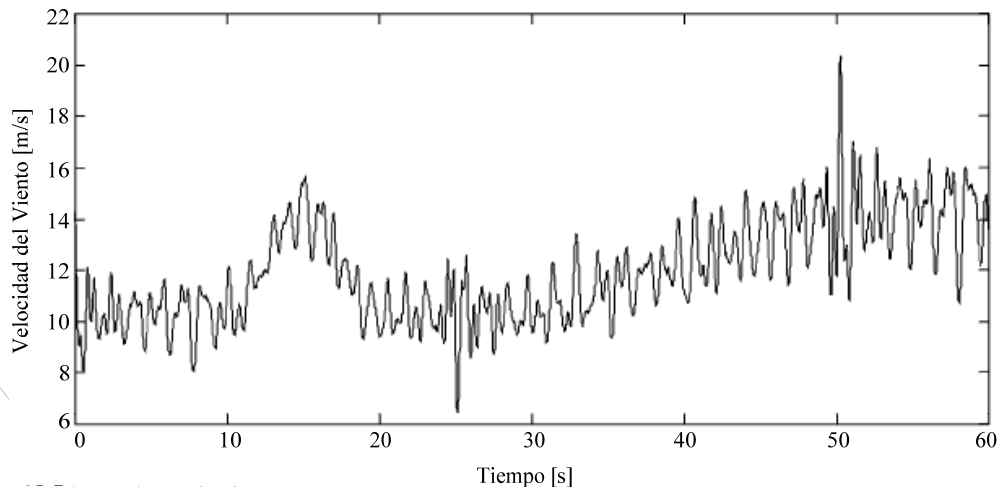


Figura 27. Velocidad del Viento obtenida en [4]

Para la simulación realizada por el programa *SimComp2V* fueron considerados los mismos parámetros establecidos en la curva patrón obtenida mediante [4], esto para poder hacer las respectivas comparaciones entre los valores teóricos y los resultados obtenidos por el programa, tomando en cuenta que para el cálculo de la densidad de turbulencia se utilizó el modelo expresado por el *Danish Standard*.

A continuación se presenta cada una de las componentes que conforman el modelo estocástico de la velocidad del viento para pequeñas escalas de tiempo.

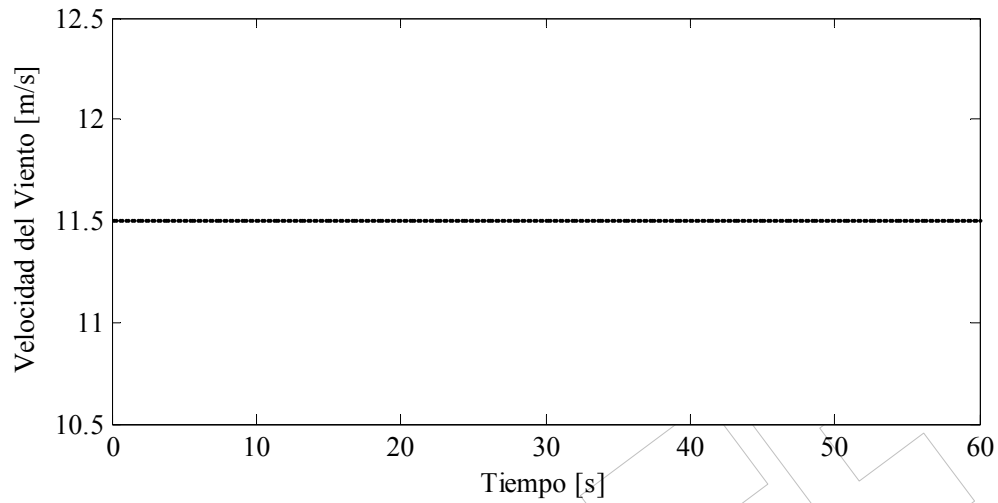


Figura 28. Componente de la velocidad promedio del viento

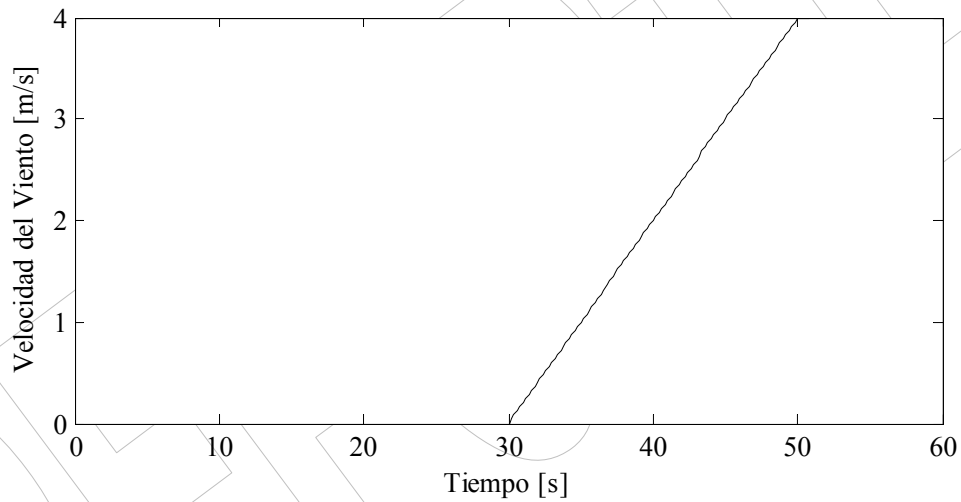


Figura 29. Componente de la velocidad de rampa del viento

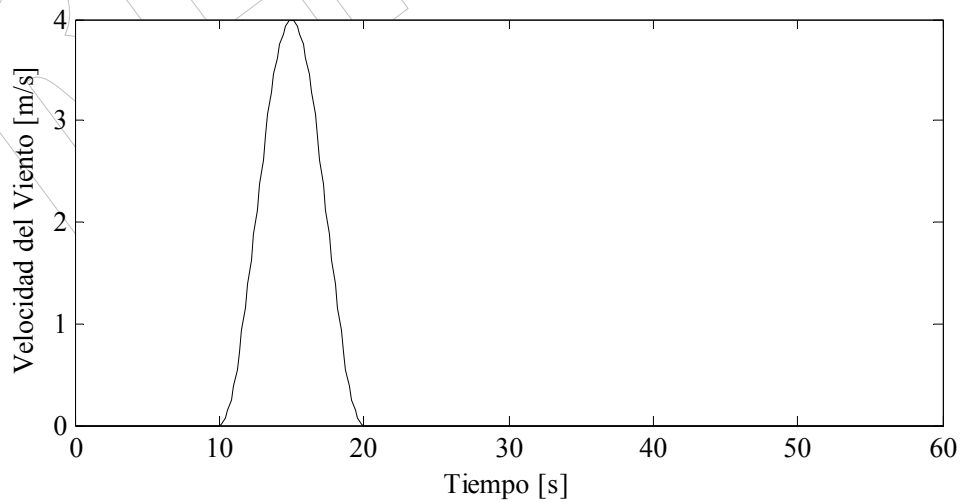


Figura 30. Componente de la velocidad de ráfaga del viento

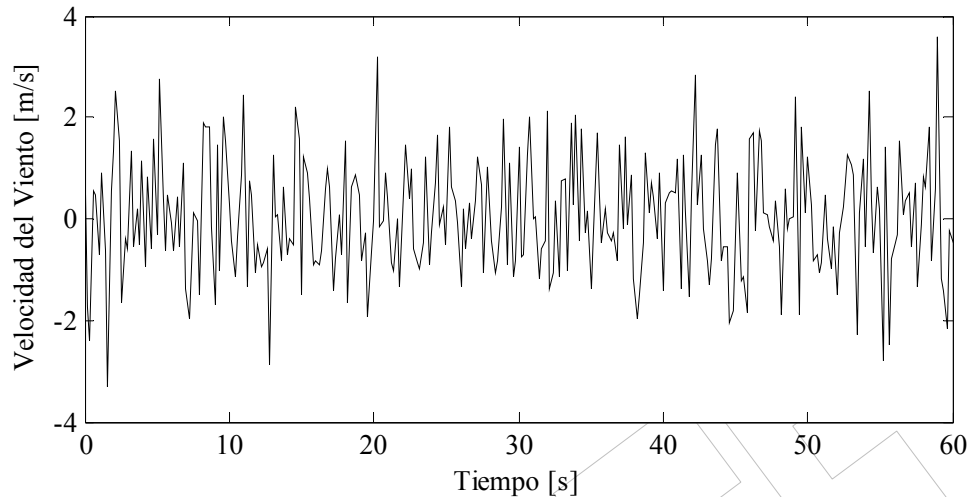


Figura 31. Componente de la velocidad de turbulencia del viento

En las curvas obtenidas mediante la simulación se puede ver cada componente de velocidad del viento por separado, observando el intervalo donde ellas existen. En la Figura 29 se observa la componente de la Velocidad de rampa definida en el intervalo que varía desde 30 hasta 50 s respectivamente, como también se muestra en la Figura 30 la componente de ráfaga del viento que ha sido reproducida para el intervalo definido entre 10 y 20s, por último se tiene la Figura 31 que representa a la componente o señal turbulenta del viento. Comparando los parámetros establecidos en la tabla 11 y los resultados obtenidos mediante las componentes del modelo estocástico se ve el cumplimiento que existe para cada componente en el intervalo definido en que han sido definidas previamente. La suma de las cuatro componentes de la velocidad del viento arrojó el resultado que se muestra en la Figura 32.

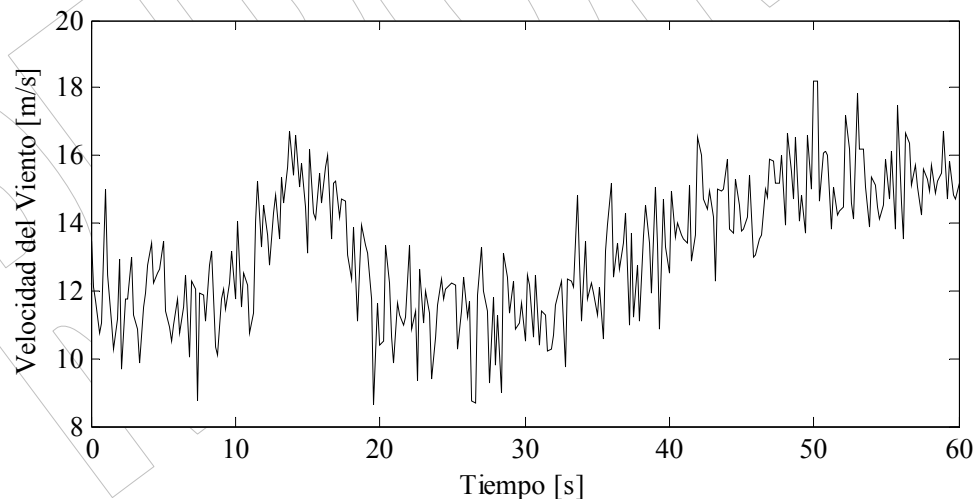


Figura 32. Velocidad del Viento obtenida mediante las consideraciones de [4]

La componente de velocidad promedio actúa sobre la curva resultante durante toda la simulación. En el intervalo comprendido entre 10 y 20s la curva resultante se traslada de acuerdo al comportamiento que tiene la componente de ráfaga descrito en la Figura 30, posteriormente se presenta el efecto causado por la componente de rampa en el intervalo comprendido entre 30 y 50s, ocasionando el aumento de la curva resultante de manera proporcional según lo descrito en la Figura 29.

El resultado obtenido en la simulación del viento mediante un modelo estocástico es comparado con una curva patrón que se muestra en la Figura 27, esto se hace con el fin de comprobar y validar el correcto funcionamiento del programa *SimComp2V*.

La Figura 32 tiene una gran semejanza y parecido a la curva patrón, no se puede decir que los resultados obtenidos son exactos ya que el modelado es una aproximación. Observando ambas curvas de manera detallada se han encontrado pequeñas diferencias, las mismas son ubicadas en los puntos máximos.

El instante de tiempo donde se hace máxima la curva patrón no coincide con el de la curva simulada, esto se debe al desplazamiento causado por el ángulo aleatorio ϕ . Un numero aleatorio es aquel que debe cumplir los requisitos de espacio equiprobable, es decir, que cada elemento tenga la misma probabilidad de ser elegido y que la elección de uno no dependa de la elección del otro.

En cada simulación que se quiera llevar a cabo se obtiene un valor de ϕ diferente al anterior, por lo que resulta ser muy difícil que los valores máximos de viento concuerden en el mismo instante de tiempo a los valores teóricos. Una solución a este problema se tiene conociendo el valor de la semilla con que se efectuó la simulación teórica. La semilla es el valor inicial que se le da a un generador de número aleatorio.

Si se logra ejecutar la simulación introduciendo el mismo valor de la semilla se obtendrán valores aleatorios iguales para ϕ en un mismo instante de tiempo, en el caso estudiado no se conoce el valor inicial de los números aleatorios, motivo por el cual no se considera el resultado como exacto.

Se puede concluir que los resultados que se obtienen mediante la utilización del programa *SimComp2V* son muy similares a los presentados por la curva patrón, por lo que se puede decir que el software queda validado para el caso particular estudiado.

3.4 Caso 4: Modelado del Viento Estocástico para Grandes Escalas de Tiempo

Para esta simulación se aplicaron las condiciones establecidas en [4] teniendo una densidad de turbulencia descrita por la ecuación de von Karman, donde se utilizó una escala de longitud de onda igual $L=73.5\text{m}$, la velocidad promedio para este caso es de $v_{wa}=11.5\text{m/s}$, la longitud de rugosidad $z_0=0.01\text{m}$ y una altura $h=30\text{m}$. En la grafica que se muestra a continuación se tiene el resultado correspondiente para este caso. La configuración del programa para este caso se indica a continuación en la tabla 12

Tabla 12. Configuración de SimComp2V para el Caso 3

<i>Start Time</i>	0.00 s
<i>End Time</i>	60.00 s
<i>Time Step</i>	0.20 s
<i>Average Wind Speed</i>	11.50 m/s
<i>Modelling Type</i>	3.00
<i>Small or Great Scale of Time</i>	1.00
<i>Hub Height</i>	30.00m
<i>Longitude of Rugedness</i>	0.01m

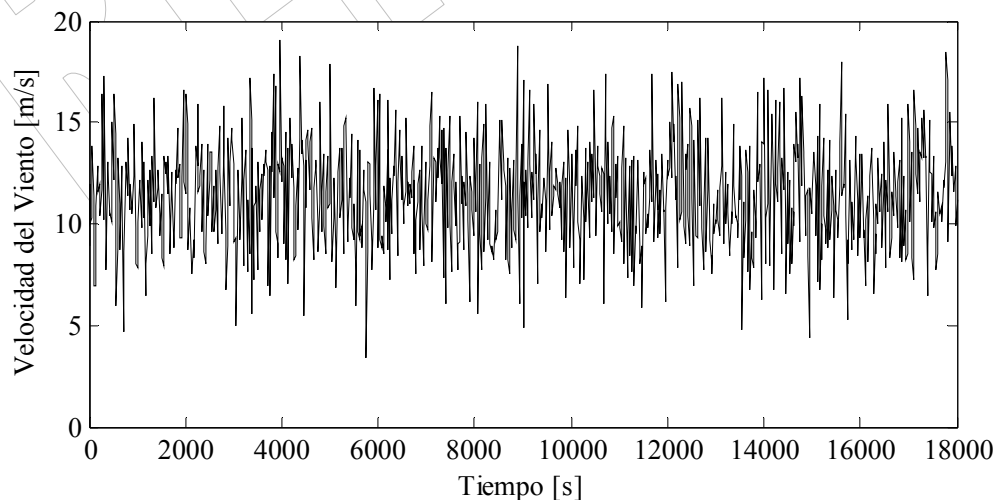


Figura 37. Velocidad del Viento obtenida mediante las consideraciones de [9]

Una vez realizada la simulación se observa la forma de onda para este tipo de aproximación, se debe acotar que esta es usada para largas escalas de tiempo, donde inclusive las horas para este tipo de simulación se considera como un pequeño tiempo. Se recomienda usar escalas de tiempo que estén en el orden de días, para observar la forma de onda de manera precisa y detallada. En estas escalas de tiempo se logra observar de manera mas clara la simulación del viento. Para este estudio no se toma en cuenta las componentes descritas anteriormente como lo son: ráfaga, rampa. Este es motivado a que el modelo se usa para grandes escalas de tiempo, y estas componentes no tienen mayor influencia sobre los resultados obtenidos.

4. Conclusiones

La simulación del viento puede ser realizada de distintas formas, entre las que se tiene la modelación considerando la velocidad del viento constante, por una serie de tiempo discretizada y por medio de un modelo estocástico.

Gran parte de los cálculos para la simulación del viento resulta ser algo complejo y consumidor de tiempo, esto motivo la creación de un software computacional que ha permitido la modelación del viento para los distintos casos, esta herramienta computacional es de gran ayuda debido a que permite que se realicen simulaciones para valores de tiempos reales y discretizados, donde se obtienen resultados muy cercano a los reales.

El programa también permite simular vientos cuyos valores cumplan con cualquier criterio aportado por el usuario, solo se requiere que los valores del mismo vengan en la forma de pares ordenados velocidad tiempo, los cuales se introducen en un archivo de Microsoft™ Excel™ que lleva como nombre *model_wind.xls*, estos parámetros se encargan de configurar el programa, para así poder llevar a cabo la simulación deseada por el usuario.

La secuencia lógica utilizada para la programación de la velocidad del viento viene dada por una serie de diagramas de flujos que se han especificado anteriormente. Los resultados que se obtienen de la simulación del viento son almacenados en un archivo de Microsoft™ Excel™ que lleva como nombre *Wind_Speed_Results*, en este archivo se almacena el valor de la velocidad con su respectivo valor de tiempo, estos datos son utilizados como entradas para simulaciones posteriores, tal es el caso del modelo del rotor, el cual se utilizara consecuentemente para el análisis dinámico de generadores eléctricos y sistemas de potencia.

5. Trabajos Futuros

El desarrollo de esta investigación abre las puertas a todos aquellos que deseen realizar un estudio sobre el comportamiento de las fuentes de energía eléctrica basados en recursos energéticos provenientes del viento. La herramienta computacional creada para la modelación del viento es valioso producto, que motiva a continuar con investigaciones posteriores que permitan mejorar el programa ya elaborado con nuevos y novedosos aportes, así como también para crear nuevas herramientas propias que permitan crear una independencia y avance tecnológico.

Un trabajo a futuro comprende el de recopilar datos del viento reales en Venezuela y efectuar el adecuado tratamiento estadístico de los mismos a fin de disponer de series de tiempo o modelos estocásticos, para puntos con potencial recurso eólico en Venezuela. En tal sentido, el programa desarrollado puede ser empleado para crear mediante la adecuada simulación las respectivas series de tiempo, necesarias para el posterior estudio o simulación del desempeño de sistemas eólicos, siguiendo datos reales.

6. Referencias Documentales

- [1] J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Diaz, S. Arnalte Gomez, *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*, Editorial Rueda S.L., Madrid, 2003.
- [2] By M. Tiedtke, "The general problem of parametrization", *Meteorological Training Course Lecture Series*, 2002.
- [3] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins y Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2001.
- [4] J.G. Slootweg "Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations." *PhD Thesis on Delft University of Technology*. Netherland, 2003.
- [5] Thomas Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Royal Institute of Technology, editorial Jhon Wiley and Sons, Ltd, Stockholm, Sweden, 2005.
- [6] ESDU. '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] DS 472. 'Code of practice for loads and safety of wind turbine constructions.' *DS 472, The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers*. 1992.
- [8] IEC, (1999). 'Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements.' International Standard 61400-1, Second Edition. International Electrotechnical Commission.
- [9] H.A. Panofsky, J.A. Dutton, *Atmospheric turbulence; models and methods for engineering applications*, US: John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.
- [10] E. Simiu, R.H. Scanlan, *Wind effects on structures; an introduction to wind engineering*, US: John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, New York, 1986.
- [11] Germanischer Lloyd. 'Rules and regulations IV – Non-marine technology, Part 1 – Wind Energy,' (supplemented 1994, 1998). Germanischer Lloyd, 1993.
- [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] Cristian Nichita, Dragos Luca, Brayima Dakyo y Emil Ceanga "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] M. Gunaratnam, D.W. Novotny, "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.
- [19] Enrique E. Gavorskis S., Manuel A. Bolívar O. "Implementación de un Programa para el Cálculo de Flujo de Potencia que Incluya los Modelos para la Simulación de Granjas de Viento", Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Maracay, Venezuela 2006.
- [20] L. Burden, J. Faires, *Análisis Numérico*, Séptima Edición, Edit. Thomson Learning 2002.

7. Glosario

A continuación se presentan algunos conceptos básicos usados en *IEC 61400 N* :

- *Sistema de control*: subsistema que recibe la información sobre las condiciones de la turbina de viento, en lo que respecta a su alrededor y los ajustes de la turbina para mantenerla en los límites de operación.
- *Límites de diseño*: máximas o mínimos valores usados en el diseño.
- *Condiciones externas (turbinas de Viento)*: factores que afectan la operación de la turbina de viento, incluyendo el régimen del viento, las condiciones eléctricas de la red y factores climáticos (temperatura, nieve, hielo, entre otros)
- *Velocidad de viento extrema*: velocidad promedio más alta.
- *Ráfaga*: cambio temporal en la velocidad del viento.
- *Eje horizontal de la turbina de Viento*: turbina de viento donde el eje del rotor es paralelo al flujo del viento
- *Estado ocioso de la turbina de Viento*: condición en que la turbina de viento está rotando lentamente y no produce potencia.
- *Máxima potencia de la turbina del viento*: el nivel más alto de potencia eléctrica neta entregada por una turbina del viento en funcionamiento normal.
- *Velocidad media del viento*: La media estadística del valor instantáneo de la velocidad del viento promediado encima de un período de tiempo dado que puede variar de unos segundos a muchos años.
- *Potencia de Salida*: potencia entregada por un dispositivo específico para un propósito específico.
- *Potencia nominal*: cantidad de potencia asignada, normalmente por el fabricante, para una condición de operación especificada.
- *Velocidad nominal del Viento*: valor de velocidad donde la turbina alcanza la potencia nominal.
- *Velocidad del rotor*: velocidad rotacional del rotor de una turbina de viento sobre su propio eje.
- *Longitud de Rugosidad*: altura extrapolada en donde la velocidad promedio del viento se hace cero si el perfil de viento vertical es asumido para tener una variación logarítmica con la altura.
- *Soporte de la estructura*: parte de una turbina de viento que comprende la torre y la fundación.
- *Intensidad de Turbulencia*: radio de la desviación estándar de la velocidad del viento para la velocidad media, determinada de las mismas muestras medidas de la velocidad del viento y tomadas sobre un período de tiempo específico.
- *Velocidad del viento*: en un punto especificado en el espacio de la velocidad del viento está la velocidad de movimiento de una cantidad diminuta de aire que rodea el punto especificado.
- *Sistema generador con turbina de viento*: Sistema que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Anexos

Naturaleza de la Turbulencia

La turbulencia se refiere a fluctuaciones en la velocidad del viento sobre una escala de tiempo relativamente rápida, típicamente menores a 10 min. En otras palabras esta corresponde al más alto pico espectral de frecuencia Figura 6. Es útil pensar que el viento consiste en una media de la velocidad de viento determinada de manera temporal (*sinóptica* y *diurno*), que varía en una escala de tiempo de una a varias horas, con fluctuaciones de turbulencia superpuestas. Estas fluctuaciones de turbulencia tienen un valor de cero cuando el valor del promedio se encuentra aproximadamente por encima de 10 min. Esta descripción es útil con tal que el Vació espectral en la Figura 6 sea razonablemente distinto.

La turbulencia es generada principalmente por dos casos: la fricción con la superficie de la tierra, la cual puede extenderse hasta donde las perturbaciones del flujo son causadas por las características topográficas tales como colinas y montañas, y el segundo caso son los efectos térmicos que pueden causar el movimiento de masas de aire verticalmente como resultado de las variación de temperatura y de la densidad del aire. A menudo estos dos efectos están interconectados, tal como cuando una masa de aire fluye sobre una cadena montañosa y es forzada a subir en una región fresca donde no es largo el equilibrio térmico del ambiente.

La turbulencia es claramente un proceso complejo, y que no puede ser representado en simples términos de determinadas ecuaciones. Evidentemente esto hace obedecer a ciertas leyes físicas, tales como esas que describen la conservación de la masa, momento y energía. Sin embargo para describir la turbulencia usando estas leyes, es necesario tomar en cuenta la temperatura, presión, densidad y humedad así como el movimiento del mismo aire en tres dimensiones. Entonces es posible formular un juego de ecuaciones diferenciales que describan el proceso, y en principio la progresión de la turbulencia puede ser pronosticada por la integración de estas ecuaciones avanzando desde un tiempo de inicio para una condición inicial segura, y sujetos a condiciones de límites seguros. En la práctica la dirección del proceso puede ser descrita como caótica en el que las pequeñas diferencias de las condiciones iniciales o límites de las condiciones pueden resultar muy diferencias con respecto a las predicciones después de un corto tiempo. Por esta razón es más útil describir el desarrollo de la turbulencia en términos de propiedades estadísticas.

Existen muchas descripciones estadísticas de la turbulencia que pueden ser útiles, dependiendo de la aplicación. Estos van desde simples intensidades de turbulencia y el factor de ráfaga para la descripción de detalles de los caminos en que las tres componentes de turbulencia varían en el espacio y el tiempo como una función de la frecuencia.

La intensidad de turbulencia es una medida del total de la turbulencia y es definida como

$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}} \quad (A.1)$$

Donde σ es la desviación estándar de la variación de la velocidad del viento alrededor de la velocidad media $\bar{U}$, usualmente definida sobre 10min o 1h. Las variaciones de la turbulencia de la velocidad del viento pueden ser consideradas para la aproximación gaussiana, lo que significa que las variaciones de la velocidad del viento son distribuciones normalizadas, con una desviación estándar σ , y una velocidad del viento media aproximada igual a $\bar{U}$. Sin embargo el final de la distribución puede ser significativamente no Gaussiana, como esta aproximación no es de confiar para estimación, se puede decir que la probabilidad de una larga ráfaga esta dentro de un periodo seguro.

La intensidad de turbulencia claramente depende de la rugosidad de la superficie de la tierra y de la altura sobre la superficie. Sin embargo esta también depende de la topografía de la superficie de donde se tienen las colinas o montañas, especialmente cuando ellos se encuentran por arriba de los vientos, y otras características locales tales como árboles y construcciones. Por otro lado también depende de los comportamientos térmicos de la atmósfera: por ejemplo, si el aire cerca de la tierra se calienta en un día de sol sube. Esto puede favorecer a una pendiente que sube a través de la atmósfera, causando un patrón de transmisión de celdas experimentado en grandes escalas de turbulencia.

Claramente como la altura aumenta sobre la tierra, producen los efectos de todos estos procesos que son manejados por interacción de la superficie de la tierra debilitan el flujo. Sobre cierta altura, el flujo de aire

puede ser considerado en gran parte libre de la influencia de la superficie de la tierra. Aquí esto puede ser considerado para ser manejado por largas escalas sinópticas de diferentes presiones y la rotación de la tierra. Este flujo de aire es conocido como un viento geostrofico. En bajas altitudes, los efectos de la superficie de la tierra pueden sentirse. Esta parte de la atmósfera es conocida como capa límite. Las propiedades de la capa límite son importantes para entender la turbulencia experimentada por las turbinas de viento.

Capa Límite

Los principales efectos que gobiernan las propiedades de la capa límite son las fuerzas de los vientos geostroficos, la rugosidad de la superficie, el efecto Coriolis debido a la rotación de la tierra y los efectos térmicos

La influencia de los efectos térmicos puede ser clasificada en tres categorías: estable, inestable y estratificación neutra. La estratificación inestable ocurre cuando hay mucha calefacción en la superficie, motivo por el cual el aire caliente cerca de la superficie sube. Al este subir se expande debido a la reducción de la presión y por lo tanto se refresca adiabáticamente, si no se refresca suficientemente para conducirse dentro del equilibrio térmico con el aire circundante, entonces este continuara subiendo, dando un elevamiento para grandes células de transmisión. El resultado es un límite de capa espeso con grandes escalas de turbulencia. Hay muchas mezclas verticales y transferencias de velocidades adquiridas, en unos pequeños cambios relativos de la velocidad media del viento con la altura.

Este refrescamiento adiabático causa un efecto en donde el aire que va subiendo regresa mas frío en comparación con los que se encuentran a su alrededor, este movimiento vertical será suprimido. Esto es conocido como estratificación estable. A menudo esto ocurre en noches frías cuando la superficie de la tierra es fresca. En esta situación, la turbulencia es dominada por la fricción con la tierra y el viento (se incrementa la velocidad de viento promedio con la altura) puede ser grande.

En las atmósferas neutra, el frío adiabático del aire que va subiendo es tal que se mantiene en equilibrio térmico con respecto a los de su alrededor. Esto con frecuencia se da en el caso de los vientos fuertes, cuando la turbulencia causada por la rugosidad de la tierra causa una mezcla en la capa límite. Para la aplicación de la energía del viento, la estabilidad neutra es usualmente la situación más importante a considerar, particularmente cuando se considera la carga de la turbulencia del viento sobre la turbina, por lo tanto estos son grandes esfuerzos del viento, debido a que estas son más grandes en los vientos fuertes. No obstante, las condiciones inestables pueden ser importante cuando las mismas puedan producir ráfagas súbitas de un bajo nivel, y las condiciones estables pueden dar lugar a subidas asimétricas de cargas debido a los altos vientos. Puede haber también cambios rápidos en la dirección del viento con la altura en esta situación.

A continuación una serie de relaciones son presentadas, y las mismas describen las propiedades de la capa límite, como lo son la intensidad de turbulencia, los espectros, la escala de longitud y las funciones de coherencia. Estas relaciones son basadas una parte en consideraciones teóricas y la otra parte en forma empírica para un ancho rango de observaciones tomadas en diferentes condiciones y locaciones de diferentes investigaciones.

En atmósfera neutra, las propiedades de la capa límite dependen principalmente de la rugosidad de la superficie y del efecto Coriolis. La rugosidad de la superficie es caracterizada por la rugosidad de longitud z_0 .

El parámetro de Coriolis f es definido como:

$$f = 2\Omega \sin(\lambda) \quad (A.2)$$

Donde se tiene que Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra y λ es la latitud. Esta es cero en el ecuador. Como la siguiente descripción solamente aplica en moderadas latitudes aquí la altura de la capa límite es dada por:

$$h = \frac{u^*}{(6f)} \quad (A.3)$$

Donde u^* es conocida como la velocidad de fricción, y es dada por:

$$\frac{u^*}{\bar{U}(h)} = \frac{k}{\left[\ln \left(\frac{h}{z_o} \right) + \Psi \right]} \quad (\text{A.4})$$

Donde se tiene que k es la constante de von Karman (aproximadamente 0.4), h es la altura sobre la tierra y z_o es la rugosidad de longitud en la superficie. Ψ es una función que depende de la estabilidad y es negativa para condiciones inestables, dando una elevación para bajos vientos turbulentos y positivo para condiciones estables dando altos vientos turbulentos, para condiciones neutra, es dada por $\Psi = 34.5fh/u^*$, que es pequeña comparada a $\ln(h/z_o)$ para situación de interés aquí. Si Ψ es ignorada, el viento es entonces dado por los perfiles logarítmicos del viento:

$$\bar{U}(h) \propto \ln \left(\frac{h}{z_o} \right) \quad (\text{A.5})$$

Una aproximación de la ley de potencia:

$$\bar{U}(h) \propto h^\alpha \quad (\text{A.6})$$

Esta es frecuentemente usada, donde el exponente α tiene un valor típico de aproximadamente 0.14, pero varía con el tipo de terreno. Sin embargo los valores de α también deben depender de los intervalos de altura sobre los cuales se aplica la expresión, haciendo esta aproximación menos útil que el perfil logarítmico.

Si la rugosidad de la superficie cambia, los perfiles de vientos turbulentos cambian gradualmente debajo de los vientos de transición, desde los perfiles originales hasta los nuevos perfiles. Esencialmente un nuevo comienzo de capa límite, y un límite entre la vieja y nueva capa límite incrementa desde cero en el punto transitorio hasta la nueva capa límite, con esta completamente estable.

Por la combinación de las ecuaciones (A1) y (A2), se obtiene la velocidad del viento en la cima de la capa límite como:

$$\bar{U}(h) = \frac{u^*}{k} \left(\ln \left(\frac{u^*}{fz_o} \right) - \ln 6 + 5.75 \right) \quad (\text{A.7})$$

Esta es similar a la llamada velocidad de viento geostrofico G , que es la velocidad aproximada del viento que maneja la capa límite como calculo desde el campo de presiones

La velocidad de viento geostrofico G es dada por:

$$G = \frac{u^*}{k} \sqrt{\left[\ln \left(\frac{u^*}{fz_o} \right) - A \right]^2 + B^2} \quad (\text{A.8})$$

Donde, para condiciones neutras, $A = \ln 6$ y $B = 4.5$. Esta relación es con frecuencia referida como ley de arrastre geostrofica.

Los efectos de la rugosidad de la superficie no solamente causan el decrecimiento de la velocidad del viento turbulento cerca de la tierra. Existe también un cambio de dirección entre la libre presión manejada del viento geostrofico y el viento cercano a la tierra. Sin embargo los vientos geostroficos son manejados por el gradiente de presiones en la atmósfera, las fuerzas de coriolis actúan sobre las fuerzas del viento para el flujo en el correcto ángulo para un gradiente de presiones causando una circulación característica del modulo. Así en el hemisferio norte, fluyen vientos desde altas presiones en el sur para bajas presiones en el norte y serán forzadas a ir hacia el este por el efecto coriolis, en efecto para conservar la velocidad angular adquirida por la rotación de la tierra. El resultado de la circulación de estos vientos en contra del sentido de las agujas del reloj alrededor de áreas de bajas presiones y en el sentido de las agujas del reloj alrededor de

áreas de altas presiones, o el otro camino alrededor del hemisferio sur. Cerca de la tierra los flujos de estas direcciones son modificados debido a los efectos de la fricción de la superficie. Los cambios total de dirección α desde los geostrophic para la superficie del viento es dada por

$$\sin \alpha = \frac{-B}{\sqrt{\left[\ln \left(\frac{u^*}{f z_o} \right) \right]^2 + B^2}} \quad (\text{A.9})$$

Variaciones a Largo Plazo y Turbulencia. Valores Medios

Una de las características más relevantes del viento es su variabilidad, situación esta que se presenta tanto en el espacio como en el tiempo, y en un amplio rango de escalas. Si se examinan en un lugar fijo las medidas que se obtienen desde un anemómetro, se observa que su variación es aleatoria e incluye múltiples frecuencias que van desde periodos correspondientes a 0.1 s (10 Hz) hasta varios años. Hay variaciones con muy alta frecuencia totalmente aleatorias y que se le suelen demonizar *turbulentas*. Hay variaciones con cambios apreciables a partir de días. Mientras que hay variaciones estacionales o mensuales del viento.

Así como hay meses que son más ventosos también se reconocen años de más viento, o hasta décadas, aunque estas variaciones a tan largo plazo sean menos predecibles, lo que en algunos casos puede dar lugar a problemas a la hora de calcular la rentabilidad económica de un parque eólico.

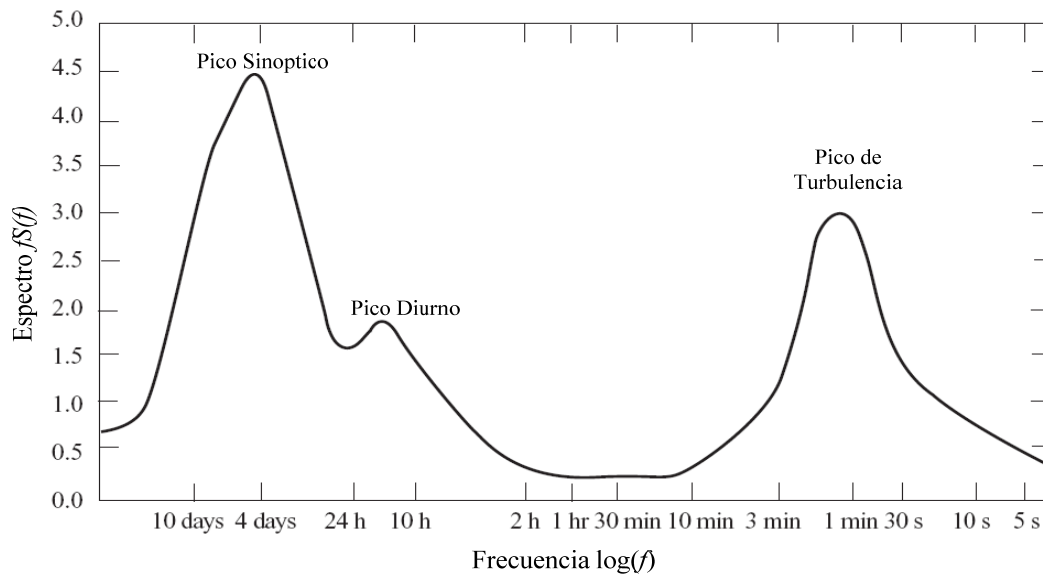


Figura A1. Espectro de Velocidad Horizontal del Viento Trazado por Van Der Hoven (1957)

En la Figura A.1 se muestra el espectro de la energía cinética del viento por unidad de masa, medido en el laboratorio Nacional de Brookhaven. La información incluida en la Figura A.1 naturalmente cambia de un lugar a otro aunque el comportamiento cualitativo no es muy diferente.

En abscisas aparece el logaritmo de la frecuencia y en ordenadas el producto de la frecuencia por el espectro. Esta curva indica cómo se distribuye la energía cinética del viento para las distintas frecuencias. El área debajo de la curva es la energía cinética media durante todo el periodo. Se observa que hay un pico alrededor de periodos cercanos a un minuto debido a la turbulencia, y otro correspondiente a las variaciones diarias del viento. Existe un tercer pico, alrededor de cuatro días que representa el paso de frentes o núcleos de altas o bajas presiones.

Dado que las fluctuaciones turbulentas son aleatorias y requieren un tratamiento estadístico, es aconsejable separarlas de las variaciones de tiempo diarias o estacionales. La forma de hacer esto es considerar el valor medio de la velocidad durante un periodo apropiado de tiempo, T , y suponer superpuestas al mismo las fluctuaciones turbulentas. Dicho valor medio para la velocidad queda dado por la siguiente expresión:

$$V_T(t_0) = V_{Tx}(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} v_x(t) dt \quad (\text{A.10})$$

donde la coordenada x se define como la dirección media del viento, que para terreno plano estaría en un plano horizontal. La velocidad instantánea se denomina v . La coordenada z es la vertical y la coordenada y perpendicular a las otras dos. Los valores medios de v_y y v_x se considerarán consecuentemente cero. En la Figura A.1 se puede observar que en el intervalo comprendido entre los periodos $T = 10$ min. y 5 horas, el contenido energético del viento es muy pequeño. A este intervalo se le conoce con el nombre de ventana o valle espectral (*spectral gap*).

De acuerdo con ello, el valor apropiado para T en la ecuación (A.10) sería de 10 min. (o de un orden de magnitud semejante) por las siguientes razones:

- El valle espectral separa claramente lo que son variaciones turbulentas del viento de lo que son variaciones diarias.
- El valor de $T = 10$ min. es mucho menor que el día (o cuatro días) correspondientes a los picos que aparecen a la izquierda en la Figura A.1. Esto quiere decir que las variaciones del viento medio dado en la ecuación (A.10), para escalas del orden del día, estarían bien representadas por una curva continua, tal como indica la Figura A.2(A).
- Las variaciones del viento asociadas a periodos ligeramente superiores a 10 min. aparecerían representados por una función discontinua en forma de escalera, tal como la indicada en la Figura A.2(B), pero dichas variaciones serían muy pequeñas, ya que caerían dentro de la ventana espectral. El viento variaría muy poco en esas escalas.
- Los tiempos de respuesta de los sistemas eléctricos o de control, así como los asociados a las frecuencias propias de los distintos elementos mecánicos, son menores que los diez minutos y deben ser estudiados como respuesta a la componente turbulenta del viento.
- En cambio, la mayor parte de la energía que se extrae del viento estará asociada a periodos mayores de diez minutos, y por tanto se obtendrá a partir de los valores medios dados en la ecuación (A.10). Aunque una pequeña parte de la energía que hay en el espectro en la parte turbulenta, en el intervalo comprendido entre el minuto y los diez minutos, puede ser extraída por la aeroturbina.

Las dos últimas consideraciones indican que se necesita información acerca de las características turbulentas del viento.

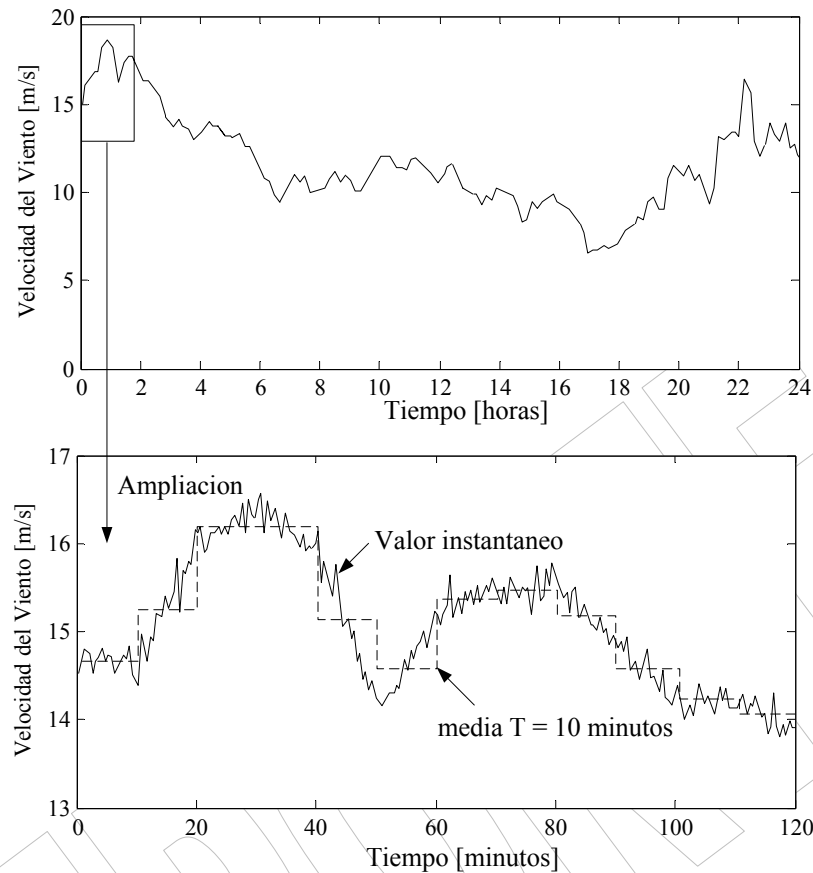


Figura A.2. Variación de la velocidad media del viento. (A) Intervalo de medida 1 día (B) Representación detallada de la velocidad instantánea y de su valor medio durante las dos primeras horas de la figura (A). Medias realizadas cada 10 minutos

Sombra de la Torre

La sombra de la torre a lo largo de la velocidad promedio es el efecto mas determinante en la salida de la potencia eléctrica de turbinas de viento de tres palas. Las turbinas de eje horizontal siempre tienen algunas formas de soporte en la estructura de la torre. La torre puede ser de estructura celosía o cilíndrica. Usualmente pequeñas turbinas de viento usan torres de celosía y nuevas turbinas largas usan torres cilíndricas.

Las torres son obstáculos que realmente modifican el flujo del viento. En la parte alta el flujo es reducido en frente de la torre e incrementado lateralmente. En la parte baja la torre hay un efecto estela que reduce el viento horizontal. Figura A3

Aquí el modelo es limitado para efecto de aumento del viento en algunos tipos de turbinas, aquí el efecto relevante es el aumento del flujo. Matemáticamente el campo del viento puede ser calculado aproximando la torre a un cilindro y asumiendo la existencia de dos flujos potenciales. El flujo es descompuesto en una componente longitudinal y otra lateral del viento. El viento en la dirección de y y x respectivamente.

La componente horizontal longitudinal (eje y) es la mas relevante para las variaciones de potencia porque esta gira para convertir el viento en potencia activa. El viento que esta lejos de la turbina es llamado velocidad de viento del ambiente (U_h) y este no interfiere en la torre. Cuando el viento viene cerca de la torre, la torre desvía el viento como se muestra en la Figura A1.

El flujo potencial del viento es constante en lugares que están alrededor de la torre y puede ser expresado como:

$$\Psi_{viento} = U_h \text{sen}(\beta) \left(d_{ts} - \frac{a^2}{d_{ts}^2} \right) \quad (\text{A.11})$$

Donde Ψ_{viento} es el flujo potencial del viento en coordenadas polares donde d_{ts} es la distancia desde la pala hasta el centro de la torre y β es el ángulo entre la pala el flujo horizontal. Descomponiendo el viento en la componente radial (área del rotor) U_{hr} y la componente tangencial U_{ht} como se ilustra en la Figura A3. La componente radial y tangencial puede ser derivada del flujo de potencial de la ecuación (A.12) y (A.13).

$$U_{hr} = -\frac{1}{d_{ts}} \frac{\partial \Psi_{viento}}{\partial \beta} = -U_h \left(1 - \frac{a^2}{d_{ts}^2} \right) \cos(\beta) \quad (\text{A.12})$$

$$U_{ht} = \frac{\partial \Psi_{viento}}{\partial d} = U_h \left(1 + \frac{a^2}{d_{ts}^2} \right) \text{sen}(\beta) \quad (\text{A.13})$$

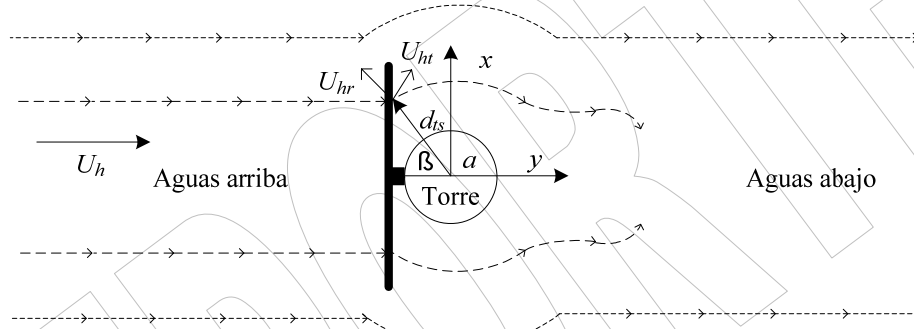


Figura A3. Efecto de la sombra de la Torre sobre el Viento Horizontal

Finalmente, las componentes del viento presentadas en las ecuaciones (A.12) y (A.13) son convertidos en el eje x-y (componente longitudinal y lateral) de la turbina de viento.

$$U_{hx} = \begin{cases} U_h \left(\frac{a^2}{d_{ts}^2} \right) \text{sen}(2\beta) & \text{para } 0 \leq \phi \leq \pi \\ 0 & \text{para } \pi \leq \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

$$U_{hy} = \begin{cases} U_h \left(1 - \frac{a^2}{d_{ts}^2} \right) \cos(2\beta) & \text{para } 0 \leq \phi \leq \pi \\ U_h & \text{para } \pi \leq \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

Donde ϕ es el ángulo que indica la posición del rotor, β es el ángulo entre la pala y el eje del rotor.

$$d_{ts}^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{A.16})$$

La torre es finita, así la sombra de la torre solo influirá en el semi plano de arriba para torres altas en términos de los ángulos (ϕ), esta influencia será en el rango de $[0, \pi]$. La Figura A.3 ilustra el efecto de sombra de la torre sobre el campo de la velocidad del viento en frente del rotor considerando la turbina de viento y una torre cilíndrica.

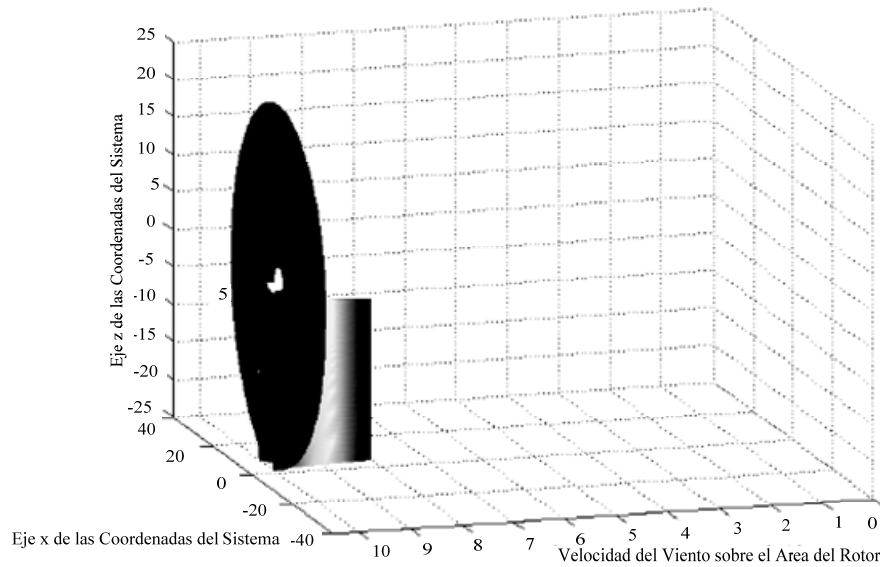


Figura A4. Campo de interferencia de la Velocidad del Viento por la Sombra de la Torre

En este caso particular, la torre reduce el 20% de la velocidad del viento en frente de la torre y solamente en el semi plano bajo. Anteriormente se asumía que la presencia de la torre no modificaba el viento, porque solo la componente horizontal del viento es modelada. Solo la componente horizontal del viento fue modelada en los primeros lugares, ya que esto es más relevante para procesos aerodinámicos para generar levantamientos que en la conversión de la potencia del viento en potencia mecánica.

La Figura A5 ilustra el efecto de sombra sobre el torque principal del eje del rotor de la turbina de viento de tres palas.

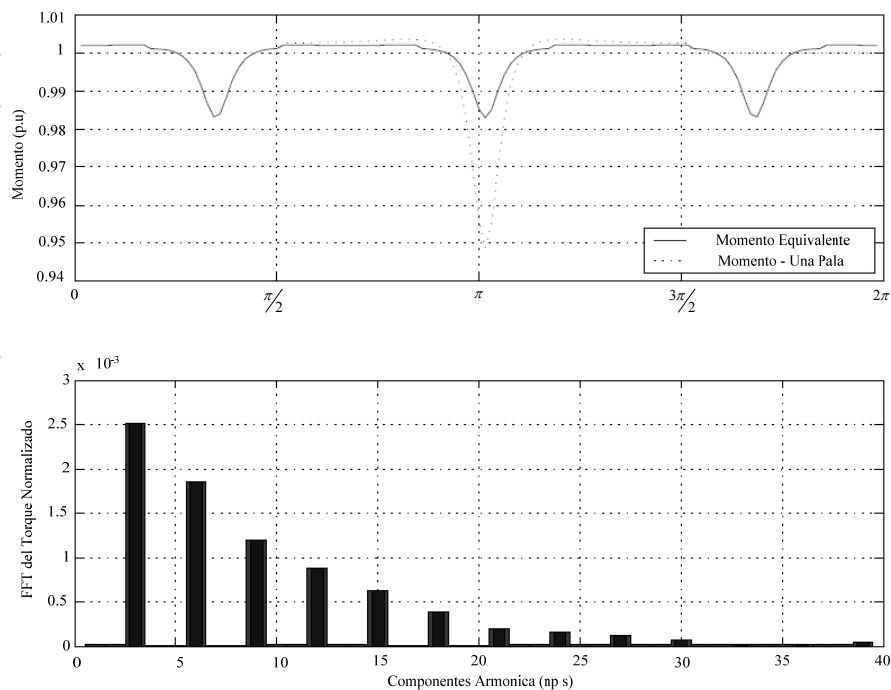


Figura A5. Torque Normalizado afectado por la Sombra de la Torre

La parte superior de la Figura A5 presenta una serie de tiempos de torques normalizados en el rotor de turbinas de viento de tres palas. La influencia de la torre en cada una de las palas es que genera varias

componentes armónicas sobre el torque. La parte inferior de la Figura A3 representa una Transformación de Fourier del momento normalizado afectado por la sombra de la torre, que revela que prácticamente solo las componentes $3np$ son presentadas.

REPORT

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.