

# Series de Tiempo para la Simulación de la Velocidad del Viento: Parte I

Responsables: Prof. Francisco M. González-Longatt

Supervisor: Prof. Francisco M. González-Longatt

---

Línea de Investigación:  
Fuentes Alternas de Energía y  
Generación Distribuida



---

## **GIAELEC**

*Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica*

<http://www.giaelec.org>

## Índice de Contenido

Índice de Contenido .....	2
Introducción .....	3
Clases de WTGS .....	4
Simulaciones .....	5
Caso I: Viento Constante, Efecto de la Turbulencia .....	6
Caso II: Viento Constante, Efecto de la Discretización .....	8
Caso III: Clases de Viento IEC-64100 .....	10
Conclusiones .....	11
Referencias Documentales .....	12

Botzador

## Introducción

Al efectuar el análisis del desempeño de un sistema de conversión de energía del viento, hay una serie de aspectos que son de importancia. Uno de ellos, corresponde a una descripción adecuada al recurso del viento en el sitio de emplazamiento del sistema eólico.

La construcción de una serie de tiempo, correspondiente a datos de velocidad del viento, que resulten adecuados para evaluar el desempeño del sistema eólico se transforma en una dificultad seria.

En este reporte de investigación se presentan los resultados del desarrollo de algunas series de tiempo cortas (60 segundos) para la velocidad del viento. Estas han sido evaluadas desde el punto de vista de estadística descriptiva y modelo de ajuste. Además de incluir algunos análisis y consideraciones respecto a aspectos de simulación.

Para proveer series de tiempo con datos de velocidad del viento, que sean adecuados para evaluar el desempeño seguro de los aerogeneradores, se ha respetado el IEC 61401-1 *Wind Turbine generator system –Part 1 Safety Requirements* ya que es uno de los estándares de seguridad para aerogeneradores de mas reconocimiento a nivel mundial. Se ha considerado este estándar consideraciones se efectúa entre otras cosas la categorización de las turbinas de viento, e una serie de clases según ciertos aspectos normalizados de las condiciones de viento.

Las series de tiempo de velocidad de viento, han sido desarrolladas empleando el programa SIMCOP2V versión 2.00, desarrollado en MATLAB. Estas series han sido caracterizadas desde varios puntos de vista, aplicando un análisis estadístico descriptivo, al igual que se ha hecho una simple evaluación de regresión lineal. Y finalmente, se ha empleado un filtro pasa-bajo de primer orden, para simular el efecto que produce la velocidad del viento sobre la pala del aerogenerador. Algunas conclusiones al respecto de estos análisis son presentados aquí.

## Clases de WTGS

Las condiciones externas a ser consideradas en el diseño del WTGS son dependientes del sitio intencionado o ubican el tipo para una instalación. Las clases de WTGS son definidos en términos de [1], [2]:

- Velocidad de viento.
- Parámetros de turbulencia.

Los valores de velocidad de viento y parámetros de turbulencia son queridos para representar los valores característicos de muchos sitios diferentes y no dar una representación exacta de ningún sitio específico.

El IEC 61400-1 *Wind turbine generator systems – Part 1 Safety Requirements* [2], identifica cuatro tipos diferentes de turbinas de viento para ajustarse a diferentes condiciones de viento en sitio, designados con clases designadas por números crecientes que corresponden a reducciones en a velocidad del viento. Los parámetros de la velocidad del viento para cada clase en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de le Velocidad del Viento para Clases de Turbinas de Viento [2]**

Parámetro		Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase S
Velocidad de referencia, $U_{ref}$ (m/s)		50.00	42.50	37.50	30.0	
Velocidad anual promedio, $U_{ave}$ (m/s)		10.00	8.50	7.50	6.00	Valores a ser especificados por el diseñador
A Alta	Intensidad de turbulencia a 15m/s $I_{15}$	0.18	0.18	0.18	0.18	
Turbulencia	Parámetro de la pendiente $a$	2.00	2.00	2.00	2.00	
B Baja	Intensidad de turbulencia a 15m/s $I_{15}$	0.16	0.16	0.16	0.18	
Turbulencia	Parámetro de la pendiente $a$	3.00	3.00	3.00	3.00	
50 year return gust speed, $1.4U_{ref}$ (m/s)		70.0	59.5	52.5	42.0	
1 year return gust speed, $1.05U_{ref}$ (m/s)		52.5	44.6	39.4	31.5	

## Simulaciones

En este reporte se persigue generar series de tiempo de velocidades de viento para un período de un minuto (60 s), donde se ha considerado los fenómenos preponderantes: ráfaga, cizalladura, y turbulencia.

En el caso de la turbulencia se ha respetado lo establecido en la Norma IEC-64100 [2], y se han respetados dos modelos: *alta turbulencia* ( $I_{15} = 0.18$ ,  $a = 2$ ) y *baja turbulencia* ( $I_{15} = 0.16$ ,  $a = 3$ ), donde el valor característico de la desviación estándar de la componente longitudinal de la velocidad del viento viene dada por

$$\sigma_1 = I_{15} \frac{(15 \text{ m/s} + aV_{hub})}{a+1} \quad (1.1)$$

Además se ha considerado el modelo de pequeñas escalas de tiempo presentando por Van Der Hoven [3], con un espectro Kaimal [1]-[2]. La serie de tiempo de velocidades de viento para un minuto, ha sido discretizada para sub-intervalos de longitud  $\Delta t$ , considerado una altura de la turbina de  $h$ , sobre el nivel del terreno, con una longitud de rugosidad  $z_0 = 0.01$  m (la cual corresponde a un terreno plano)

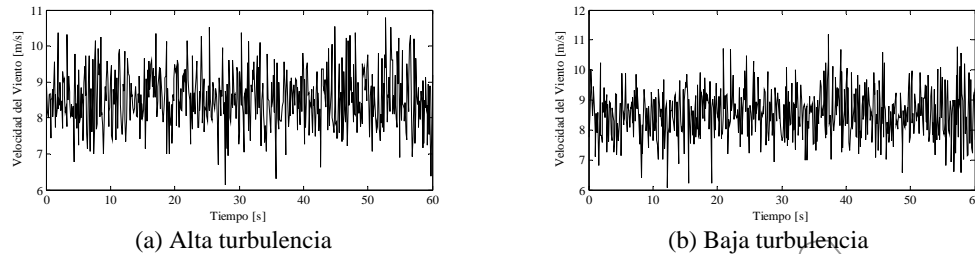
Para la creación de las series de tiempo, se ha hecho uso del programa SIMCOP2V versión 2.00,

- *Caso I: Viento Constante Efecto de las Turbulencia:* Se esta interesado en examinar el comportamiento de un viento durante un minuto con velocidad constante. Para situar un viento clase IV según la Norma IEC-64100, se ha tomado una la velocidad promedio de 8.5 m/s. Se han generado dos series de tiempo: (a) Alta turbulencia y (b) Baja turbulencia.
- *Caso II: Viento Constante, Efecto de la Discretización:* En este caso se ha desarrollado series de tiempo de un minuto para la velocidad del viento, se ha considerado constante a promedio de 15 m/s, se ha elevado la altura  $h = 80$  m. Las series han sido creadas considerando baja y alta turbulencia según la norma IEC 64100. Una distinción adicional, ha sido, que las series han sido creadas en dos casos fundamentales con diferentes pasos de discretización,  $\Delta t = 0.1$  seg y  $\Delta t = 1$  seg.
- *Caso III: Clases de Viento IEC-64100 [2]:* Series de tiempo considerando las clases aportadas por la norma IEC-64100 han sido desarrolladas, con la idea de proveer al lector datos que puedan ser empleados para la evaluación del desempeño de los aerogeneradores, y que cumplan dos estándares universitarios. Aspectos importantes que complementan el comportamiento de la velocidad real del viento han sido considerados: turbulencia, ráfaga y cizalladura.

## Caso I: Viento Constante, Efecto de la Turbulencia

Se considerado un viento Clase IV según IEC-64100, y se ha generado con el programa SIMCOP2V versión 2.00, una serie de tiempo de un minuto (60 segundos) con velocidad promedio  $v_{prom} = 8.5$  m/s. esta serie ha sido desarrollado para una altura de  $h = 30$ , con una rugosidad del terreno de  $z_0 = 0.01$ m.

Condiciones de turbulencia alta y baja han sido simuladas; y los resultados de la serie de tiempo considerando una discretización con  $\Delta t = 0.1$  segundos, son presentados en la Figura 1.



**Figura 1. Velocidad del Viento,  $v_{prom} = 8.5$  m/s,  $h = 30$ m,  $z_0 = 0.01$ m  $\Delta t = 0.1$  seg**

En la Tabla 1, se muestran algunos indicadores estadísticos descriptivos de la serie de tiempo desarrollada.

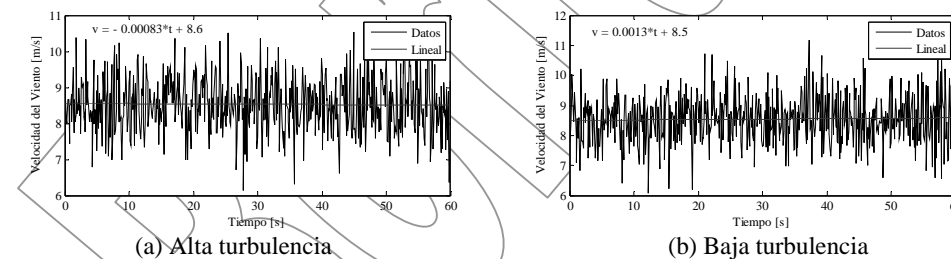
**Tabla 1. Estadística descriptiva de serie de tiempo de Velocidad de Viento, Caso I**

Indicador	Alta Turbulencia	Baja Turbulencia
Valor máximo, $U_{max}$	40.879 m/s	11.17 m/s
Valor promedio observado, $U_{prom}$	8.533 m/s	8.544 m/s
Valor mínimo, $U_{min}$	6.129 m/s	6.07 m/s
Desviación estándar, $\sigma$	0.77486 m/s	0.8109 m/s

Al analizar la serie de tiempo de velocidad de viento para ambas turbulencia, se muestra que el promedio de las observaciones ronda, el valor especificado (8.5 m/s), sin embargo, existen algunas discrepancias, debido a la componente aleatoria generada en el espectro de Kaimal, y que indica que la baja turbulencia tiende a afectar en mayor forma el promedio de las observaciones.

La desviación estándar de las observaciones de la serie de tiempo de la velocidad de viento, resulta mayor en el caso de las series de tiempo generado con baja turbulencia, respecto a las de alta turbulencia. Y esto es coincidente con el hecho de que las observaciones más extremas de velocidad son registradas en la serie con baja turbulencia.

A la serie de tiempo de velocidades de viento generadas, se le ha aplicado un análisis de tendencias, mediante una regresión lineal simple a partir de los datos de la serie, en la Figura 2 se muestran las observaciones y las respectivas tendencias.



**Figura 2. Análisis de Regresión para Viento Clase I**

Las rectas de regresión estimadas son las siguientes:

$$v(t) = -0.00083t + 8.6 \text{ [m/s]} \quad \text{Alta Turbulencia}$$

$$v(t) = -0.00083t + 8.5 \text{ [m/s]} \quad \text{Baja Turbulencia}$$

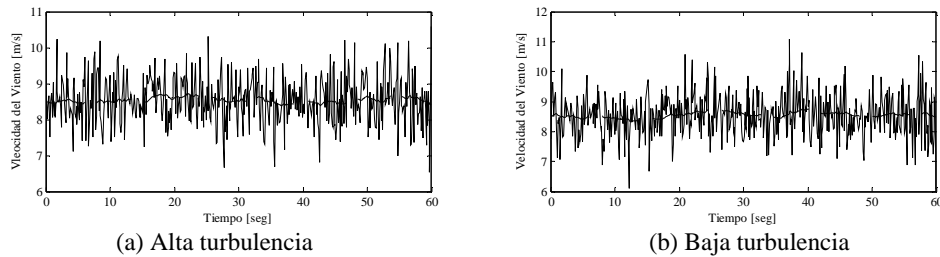
De estas rectas se desprende en primer que se tratan de rectas casi horizontales, debido a que ambas pendientes poseen valores muy pequeños, de igual modo en ambos casos, las rectas poseen pendiente negativa.

Observando el término independiente de la recta de regresión, se puede ver que sus valores rondan la media de las observaciones de velocidad examinadas; aunque su valor no coincide. Y de hecho, la serie de tiempo con alta turbulencia denota el mayor término respecto a la baja turbulencia.

Para evaluar el impacto preliminar que tienen las series de tiempo de velocidad del viento desarrolladas en el desempeño de un aerogenerador; se ha decidido examinar aplicar estas series de tiempo a un filtro pasa bajo de primer orden, con constante de tiempo de 4 segundos. Esto permite

simular el comportamiento, de la atenuación de las componentes de alta frecuencia del viento que se produce en la superficie de las palas.

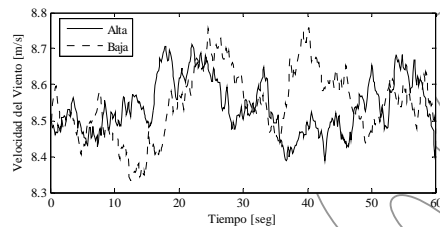
En la Figura 3 se muestra los resultados de aplicar la serie de tiempo de velocidades del viento a filtro; mostrando una atenuación bastante alta en la señal tanto en alta como baja turbulencia.



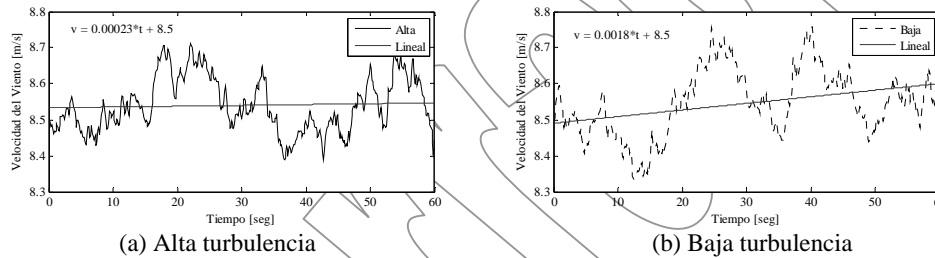
(a) Alta turbulencia (b) Baja turbulencia

**Figura 3. Efecto del Filtrado de Primer Orden sobre el Viento Clase I**

En la Figura 4, se muestra una comparación entre la velocidad del viento de un minuto con alta y baja turbulencia al ser afectada por el filtro de primer orden. Resulta evidente por simple inspección el hecho demostrado por la estadística descriptiva, que el viento con baja turbulencia tiende a tener mayores valores extremos. Sin embargo, el valor de la media de la serie de alta turbulencia 8.54 m/s es menor que la e baja turbulencia 8.547 m/s.



**Figura 4. Comparación del viento clase I con Filtrado de Primer Orden**



(a) Alta turbulencia (b) Baja turbulencia

**Figura 5. Análisis de Regresión para Viento Filtrado Clase I**

## Caso II: Viento Constante, Efecto de la Discretización

Se ha considerado una serie de tiempo de velocidad del viento de un minuto con velocidad promedio  $v_{prom} = 15$  m/s, a una altura de  $h = 80$  m, rugosidad del terreno de  $z_0 = 0.01$ m, se han simulado dos condiciones de turbulencia, alta y baja, siguiendo los modelos dados por el IEC 64100.

La serie de tiempo para la velocidad del viento ha sido obtenida con el programa SIMCOP2V versión 2.00, y se ha considerado inicialmente un paso de tiempo de  $\Delta t = 0.1$  segundos para la discretización, y sus resultados se muestran en la Figura 6, se muestran la grafica para alta y baja turbulencia (a y b respectivamente). En la Figura 7, se muestran los resultados pero en este caso para una discretización de  $\Delta t = 1$  segundos.

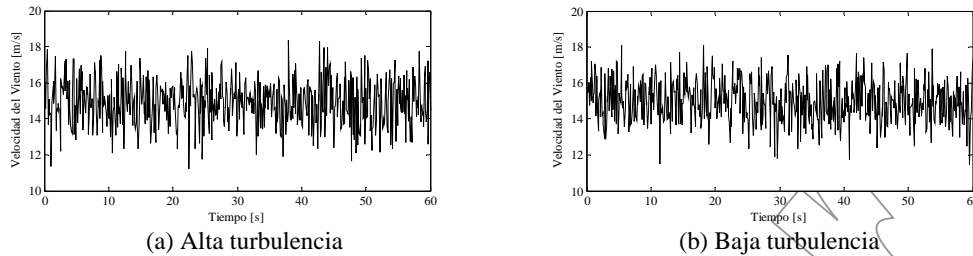


Figura 6. Velocidad del Viento,  $v_{prom} = 15$  m/s,  $h = 80$ m,  $z_0 = 0.01$ m,  $\Delta t = 0.1$  seg

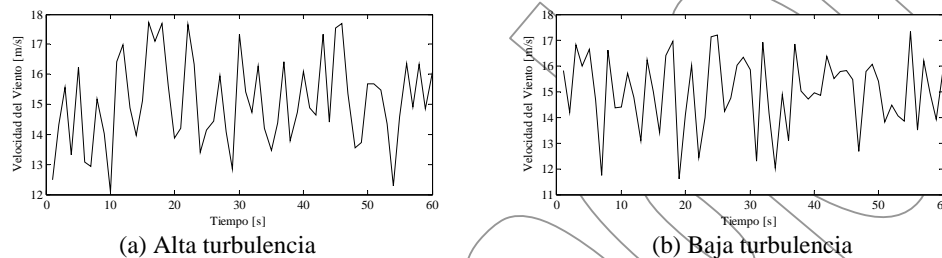


Figura 7. Velocidad del Viento,  $v_{prom} = 15$  m/s,  $h = 80$ m,  $z_0 = 0.01$ m,  $\Delta t = 1$  seg

Una diferencia muy significativa desde el punto de vista cualitativo es palpable. Debido a que la discretización es hecha a pasos de tiempo diferentes, se observa una reducción apreciable de las componentes de alta frecuencia.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los principales estadísticos descriptivos de las series de tiempo desarrolladas con diferentes pasos de tiempo de discretización.

Se ha de reconocer que el uso de una menor frecuencia de muestreo ( $\Delta t = 1$  seg) produce en las series de tiempo una desviación estándar mayor para cualquier turbulencia en los valores observados.

Para los otros estadísticos: promedio, máximo, mínimo, se respeta que para alta turbulencia registran valores mas altos que para baja turbulencia, y en todo caso la disminución en la frecuencia de muestreo produce menores valores.

Tabla 2. Estadística descriptiva de serie de tiempo de Velocidad de Viento, Caso II

Indicador	$\Delta t = 0.1$ seg		$\Delta t = 1$ seg	
	Alta Turbulencia	Baja Turbulencia	Alta Turbulencia	Baja Turbulencia
Valor máximo, $U_{max}$	18.3377 m/s	18.1248 m/s	17.7077 m/s	17.3366 m/s
Valor promedio observado, $U_{prom}$	14.9300 m/s	14.9890 m/s	15.0629 m/s	14.9805 m/s
Valor mínimo, $U_{min}$	11.2024 m/s	11.4742 m/s	12.0694 m/s	11.3366 m/s
Desviación estándar, $\sigma$	1.26785 m/s	1.1793 m/s	1.4765 m/s	1.4549 m/s

Un análisis de regresión simple, para probar el ajuste de las series de tiempo al modelo lineal.

### Discretización a $\Delta t = 0.1$ seg

$$v(t) = -0.0033t + 15 \text{ [m/s]} \quad \text{Alta Turbulencia}$$

$$v(t) = -0.0067t + 15 \text{ [m/s]} \quad \text{Baja Turbulencia}$$

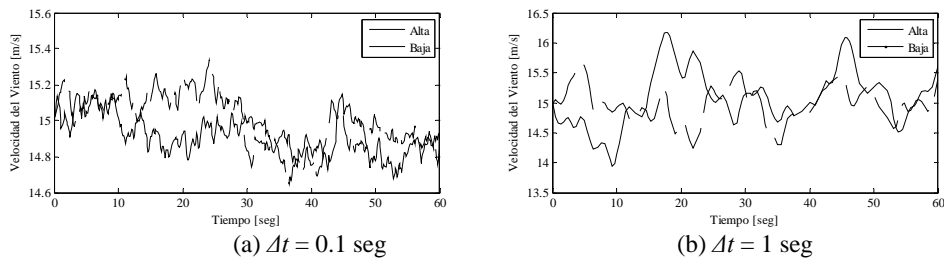
### Discretización a $\Delta t = 1$ seg

$$v(t) = 0.012t + 15 \text{ [m/s]} \quad \text{Alta Turbulencia}$$

$$v(t) = -0.00095t + 15 \text{ [m/s]} \quad \text{Baja Turbulencia}$$



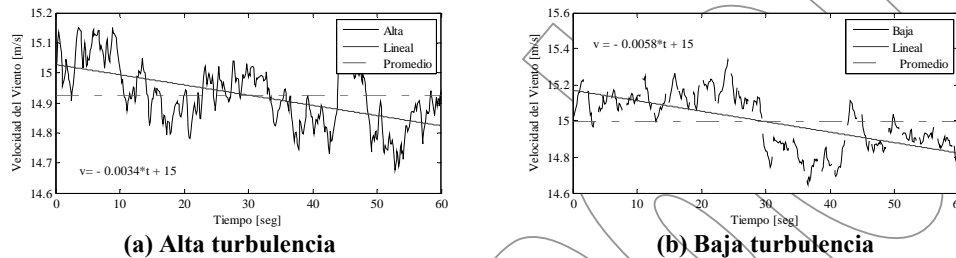
El análisis de tendencias hace indicar que independientemente de la discretización, los términos independientes poseen el mismo valor (15 m/seg, para los decimales examinados). Sin embargo las pendientes de la rectas de ajuste no es concluyente el efecto.



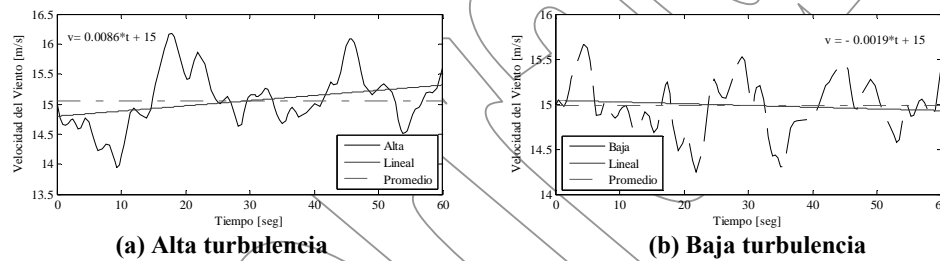
**Figura 8. Velocidad del Viento Filtrada,  $v_{prom} = 15$  m/s,  $h = 80$  m,  $z_0 = 0.01$  m,  $\Delta t = 0.1$  seg**

Para medir el comportamiento de la velocidad del viento en la pala de un aerogenerador, estas series de tiempo han sido aplicadas a un filtro de primer orden con constante de tiempo de 4 segundos. Los resultados son mostrados en la Figura 6.

Se observa que la serie de tiempo de frecuencia de muestreo más alta, conserva aun componentes de alta frecuencia, sin embargo, estas son atenuadas en magnitud mucho más que el caso del muestreo a baja frecuencia (1 segundo).



**Figura 9. Velocidad del Viento Filtrado,  $v_{prom} = 15$  m/s,  $h = 80$  m,  $z_0 = 0.01$  m,  $\Delta t = 0.1$  seg**



**Figura 10. Velocidad del Viento Filtrado,  $v_{prom} = 15$  m/s,  $h = 80$  m,  $z_0 = 0.01$  m,  $\Delta t = 1$  seg**

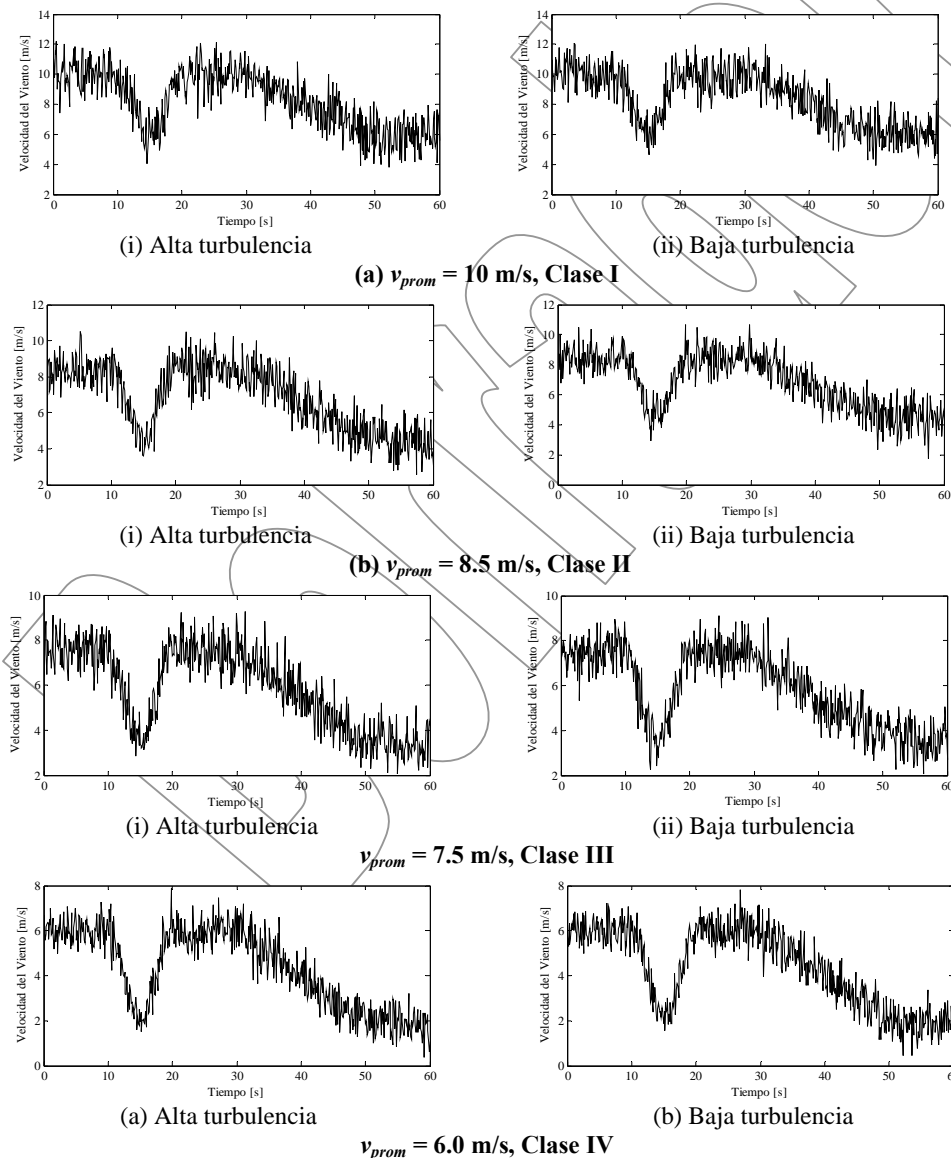
### Caso III: Clases de Viento IEC-64100

La norma IEC-64100 identifica cuatro tipos diferentes de turbinas de viento para ajustarse a diferentes condiciones de viento en sitio, designados con clases que corresponden a números crecientes que definen ciertas condiciones de velocidad del viento. En este reporte se han creado series de tiempo de velocidad del viento considerando los principales componentes característicos. En el caso de la turbulencia se ha respetando la norma IEC 64100, considerando turbulencia alta y baja, pero además se han incluido la simulación de la ráfaga de viento, la cizalladura, y rampa.

**Tabla 3. Parámetros Característicos de la serie de tiempo simulada, Caso III**

Parámetro	Tiempo
Tiempo de comienzo de la rampa, $T_{sr}$	30 s
Tiempo de final de la rampa, $T_{er}$	10 s
Tiempo de comienzo de la ráfaga, $T_{sg}$	10 s
Tiempo final de la ráfaga, $T_{eg}$	20 s
Amplitud de la rampa, $A_r$	-4 m/s
Amplitud de la cizalladura, $A_g$	-4 m/s

Las series de tiempo de la velocidad del viento para un minuto han sido desarrolladas haciendo uso del programa SIMCOP2V versión 2.00, desarrollado en MATLAB. Se ha considerado una discretización de  $\Delta t = 0.1$  segundos, y los resultados son presentados en al Figura 11.



**Figura 11. Serie de tiempo para la Viento diferentes casos**

## Conclusiones

En este documento se han desarrollado un conjunto de series de tiempo de un minuto para velocidad de viento. Han sido construido haciendo uso del programa SIMCOP2V versión 2.00, desarrollado en MATLAB, y que considera los fenómenos característicos más importantes de la velocidad de viento para pequeñas escalas de tiempo: velocidad promedio, turbulencia, ráfaga y cizalladura.

Considerando una velocidad de viento constante durante un minuto donde se incluye el efecto de la turbulencia se ha encontrado que el promedio de las observaciones es muy cercano a la velocidad promedio especificada, aunque existen algunas discrepancias, debido a la componente aleatoria generada en el espectro de Kaimal, y que indica que la baja turbulencia tiende a afectar en mayor forma el promedio de las observaciones. Por su parte la desviación estándar de las observaciones resulta mayor en el caso donde se considera una baja turbulencia, respecto a las de baja turbulencia. Y esto es coincidente con el hecho de que las observaciones más extremas de velocidad son registradas en la serie con baja turbulencia.

La crear una serie de tiempo de velocidad de viento, considerando diferentes tiempos de discretización se ha mostrado diferencia muy significativa desde el punto de vista cualitativo. Se observa una reducción apreciable de las componentes de alta frecuencia. El uso de una menor frecuencia de muestreo produce en las series de tiempo una desviación estándar mayor para cualquier turbulencia en los valores observados. Para los restantes estadísticos descriptivos: promedio, máximo, mínimo, se respeta que para alta turbulencia registran valores mas altos que para baja turbulencia, y en todo caso la disminución en la frecuencia de muestreo produce menores valores.

El efecto de filtrado que impone las palas del aerogenerador a las componentes de alta frecuencia de la velocidad del viento, se ha simulado la aplicación de las series de tiempo a un filtro pasabajo de primer orden. Se observa que la turbulencia no tiene efecto significativo sobre la velocidad promedio. Sin embargo el paso de tiempo seleccionado para la discretización, si tiende a afectar los indicadores estadísticos descriptivos.

Se han presentado series de tiempo para la velocidad del viento, considerando el modelo de alta y baja turbulencia de acuerdo a la norma IEC 64100, y donde además del efecto de la turbulencia se han incluido el efecto de la ráfaga y la cizalladura. Mayores análisis de estas series no han sido acometidos, sin embargo, se ha dejado análisis detallados de estas para próximos reportes de investigación.

En este reporte se han presentado los resultados de la simulación de varias series de tiempo para la velocidad del viento, donde se han efectuado un análisis de los principales estadísticos descriptivos, al igual que un análisis de regresión lineal simple; incluso se ha evaluado el efecto de la atenuación de las componentes de alta frecuencia de la velocidad del viento en las palas del aerogenerador. El efecto de la turbulencia y el paso de discretización de la serie han sido evaluados.

Finalmente se concluye que los datos de velocidad de viento presentados en este reporte son aptas para ser empleadas simulaciones computarizadas que evalúen el desempeño de sistemas de generación eólica.

## Referencias Documentales

- [1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd. 2001.
- [2] IEC, (1999). “*Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements*”. International Standard 61400-1, Second Edition. International Electrotechnical Commission.
- [3] Van der Hoven, I., (1957). “*Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour.*” J. Met., 14, 160–4.

Botzador

Este documento solo es para uso académico o de investigación. Derechos reservados de autor. Copyright © 2008.