

**Reporte de Investigación
2008-01**

**Normativa IEC 64100-1:
Modelado del Viento
en condiciones Normales
Parte I**

Responsables: Prof. Francisco M. González-Longatt

Supervisor: Prof. Francisco M. González-Longatt



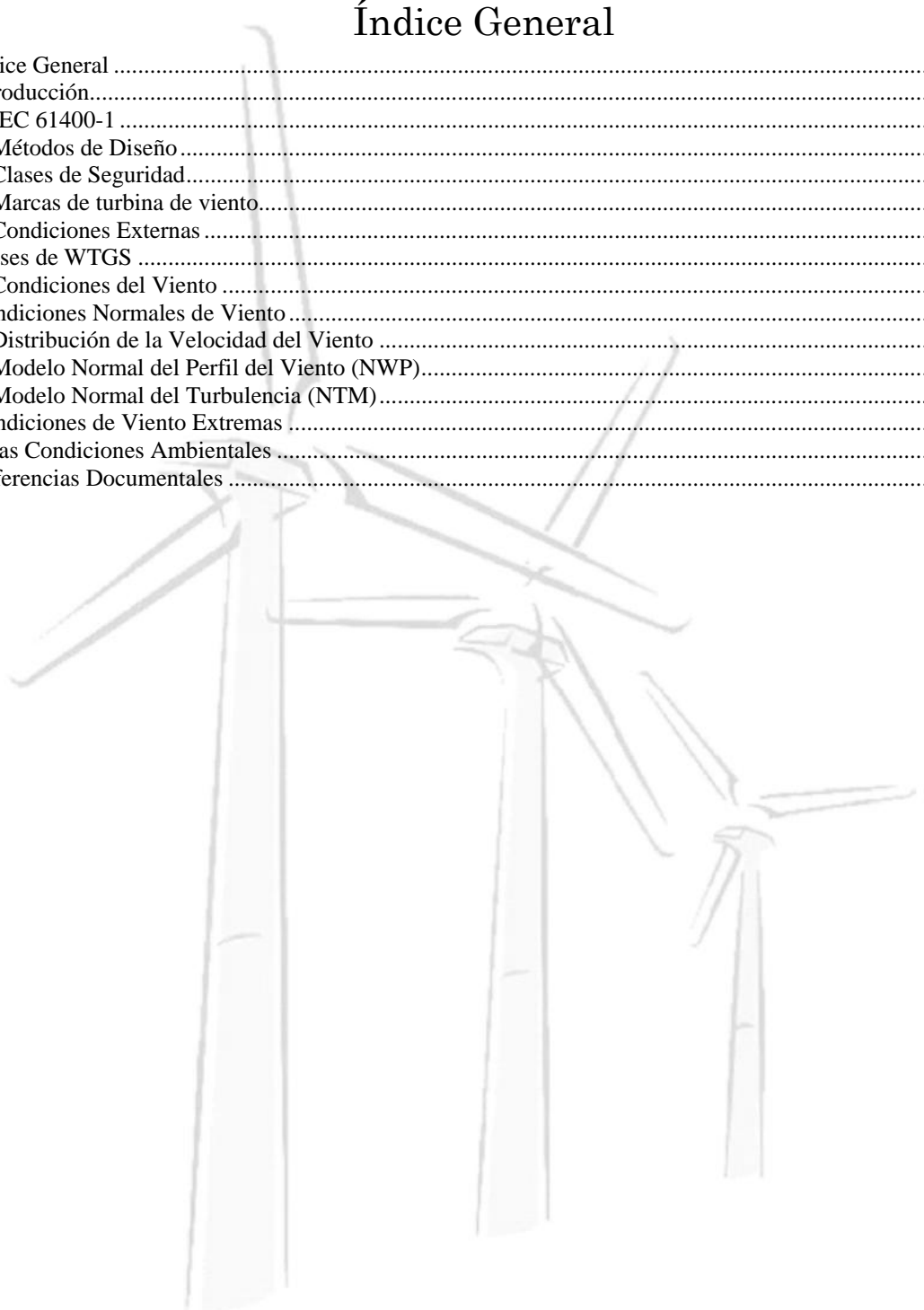
Línea de Investigación:
**Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida**



Enero-2008

Índice General

Índice General	2
Introducción.....	3
IEC 61400-1	3
Métodos de Diseño	3
Clases de Seguridad.....	4
Marcas de turbina de viento.....	4
Condiciones Externas	4
Clases de WTGS	4
Condiciones del Viento	6
Condiciones Normales de Viento	6
Distribución de la Velocidad del Viento	6
Modelo Normal del Perfil del Viento (NWP).....	6
Modelo Normal del Turbulencia (NTM).....	6
Condiciones de Viento Extremas	8
Otras Condiciones Ambientales	8
Referencias Documentales	8



Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del autor.
Derechos reservados de autor. Enero 2008. fglongatt@ieee.org

Introducción

La preparación de un estándar nacional e internacional que contuviera las reglas de diseño de turbinas de viento comenzó en 1980. La primera publicación fue un conjunto de regulaciones para la certificación llevada a cabo por *Germanischer Lloyd* en 1986. Esas reglas iniciales fueron subsecuentemente considerablemente definidas como el estado del conocimiento creció, llevando a la publicación por la *Germanischer Lloyd* de la Regulación para Certificación de Sistemas de Conversión de Energía del Viento en 1993. Esto fue además completado por suplementos en 1994 y 1998. Mientras tanto, publicaciones de estándar nacionales fueron publicadas en Holanda (NEN 6096, Dutch Standard, 1988) y en Dinamarca (DS-472, Danish Standard, 1992).

El *International Electrotechnical Commission* (IEC) comenzó a trabajar en el primer estándar internacional en 1988, llevando a la publicación del IEC 1401-1 *Wind Turbine generator system –Part 1 Safety Requirements* en 1994 (segunda edición IEC, 1997). Una edición revisada contiene algunos cambios significativos apareció en 1999, y dio lugar al nuevo número IEC 61400-1 [1].

En este reporte de investigación se presenta los resultados de una simple revisión documental de la norma IEC 61400-1.

IEC 61400-1

El IEC 61400 es un estándar internacional perfila exigencias mínimas de seguridad para sistemas de generador de turbina de viento y no es querido para el empleo como una especificación de diseño completa o el manual de instrucciones [2].

Cualquiera de las exigencias de este estándar puede ser renunciada si adecuadamente puede ser demostrado que la seguridad del sistema no es comprometida.

El cumplimiento con éste estándar no releva a ninguna persona, organización, o la corporación de la responsabilidad de observar otras regulaciones aplicables [2].

El IEC 61400-1 *Wind turbine generator systems – Part 1 Safety Requirements*, trata con la filosofía de seguridad, la garantía de calidad y la integridad de la ingeniería, y especifica exigencias para la seguridad de *Sistemas de Generador de Turbina de Viento* (WTGS), incluyendo el diseño, la instalación, el mantenimiento, y la operación en condiciones especificadas ambientales.

Su objetivo es de proporcionar el nivel apropiado de protección contra el daño de todos los peligros de estos sistemas durante su vida planificada [2].

Este estándar está preocupado con todos los subsistemas de WTGS como el control y mecanismos de protección, sistemas internos eléctricos, sistemas mecánicos, estructuras de apoyo y el equipo de interconexión eléctrico.

Este estándar se aplica a WTGS con el área barrida igual a o más grande que 40 m^2 ($R > 3.56\text{m}$).

Los requerimientos de ingeniería y exigencias técnicas para asegurar la seguridad del estructural, mecánico, eléctrico y los sistemas de control del WTGS es cubierto por el IEC 1400-1. Esta especificación de exigencias se aplica al diseño, la fabricación, la instalación y el mantenimiento de WTGS y el proceso de dirección de calidad asociado. Además, los procedimientos de seguridad que han sido establecidos en varias tecnologías que son usadas en WTGS y que deben ser respetados en la instalación, la operación y el mantenimiento [2].

Métodos de Diseño

El estándar IEC 61400-1 requiere el empleo de un modelo de dinámica estructural para predecir cargas de diseño. Este modelo será usado determinar las cargas sobre una gama de velocidades de viento, usando las condiciones de turbulencia y otras condiciones de viento extremas y situaciones de diseño. Todas las combinaciones relevantes de condiciones externas y situaciones de diseño son analizadas. En este estándar un juego mínimo de tales combinaciones ha sido definido como casos de carga en este estándar [2].

Los datos de las pruebas a escala completa de un WTGS pueden ser usados aumentar la confianza en valores de diseño predichos y verificar modelos de dinámica estructurales y situaciones de diseño.

La verificación de la suficiencia del diseño será hecha por el cálculo y/o por pruebas. Si los resultados de la prueba son usados en esta verificación, mostrarán las condiciones externas durante la prueba para reflejar los valores característicos y situaciones de diseño definidas en este estándar. La selección de condiciones de prueba, incluyendo las cargas de prueba, tomará en cuenta de los factores de seguridad relevantes.

Clases de Seguridad

Un WTGS será diseñado según una de las dos clases siguientes de seguridad:

- una *clase normal de seguridad* que se aplica cuando un fracaso causa el riesgo de daño corporal o consecuencias económicas y sociales;
- una *clase especial de seguridad* que se aplica cuando las exigencias de seguridad son determinadas según regulaciones locales y/o las exigencias de seguridad son estados de acuerdo con entre el fabricante y el cliente.

Marcas de turbina de viento

La información siguiente será como un mínimo, prominente y de manera legible mostrada sobre el de manera legible en la placa con el nombre de la turbina marcado:

- fabricante y país del WTGS
- modelo y el número de serie;
- año de producción;
- potencia nominal;
- Se refieren la velocidad de viento, U_{ref} ;
- la altura de cubo el viento de operaciones se apresura la gama, $U_{in} - U_{out}$;
- gama de temperatura ambiente de operaciones;
- la clase IEC de la WTGS;
- tensión nominal en los terminales WTGS;
- la frecuencia en los terminales WTGS o la frecuencia se extienden en el caso que la variación nominal es mayor que el 2 %.

Condiciones Externas

Los WTGS son sujetos a las condiciones ambientales y eléctricas que pueden afectar su carga, durabilidad y operación. Asegurar el nivel apropiado de seguridad y fiabilidad, entonces los efectos ambiental, eléctrico y los parámetros del suelo debe ser tenidos en cuenta en el diseño y explícitamente será declarado en la documentación de diseño.

- Las condiciones ambientales son divididas en *condiciones de viento* y *otras condiciones ambientales*.
- Las condiciones eléctricas se refieren a las condiciones de red.
- Las propiedades de suelo son relevantes al diseño de fundaciones WTGS.

Cada tipo de condición externa puede ser subdividido en una *condición normal* y una *condición extrema* externa.

Las *condiciones normales externas* generalmente conciernen la carga a largo plazo estructural y condiciones de funcionamiento, mientras que las condiciones extremas externas representan las condiciones de diseño raras pero potencialmente críticas externas.

Los casos de carga de diseño consistirán en una combinación de estas condiciones externas con la turbina de viento modos operacionales.

Las condiciones de viento son la consideración primaria externa para la integridad estructural. Otras condiciones ambientales también afectan rasgos de diseño como la función de sistema de control, la durabilidad, la corrosión, etc.

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 velocidad de viento y parámetros de turbulencia. La intención de las clases es la de cubrir la mayor parte de usos.

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, la Evaluación de condiciones externas.

El objetivo es de alcanzar la clasificación los WTGS con la robustez que varía claramente gobernada por la velocidad de viento y parámetros de turbulencia. La Tabla 1 especifica los parámetros básicos que definen las clases WTGS.

El IEC 61400-1 *Wind turbine generator systems – Part 1 Safety Requirements*, 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 la velocidad del viento. Los parámetros de la velocidad del viento para cada clase en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la Velocidad del Viento para Clases de Turbinas de Viento

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
A Alta Intensidad de turbulencia a 15m/s I_{15}	0.18	0.18	0.18	0.18	especificados
Turbulencia Parámetro de la pendiente a	2.00	2.00	2.00	2.00	por el
B Baja Intensidad de turbulencia a 15m/s I_{15}	0.16	0.16	0.16	0.18	diseñador
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	

La *Velocidad de referencia* U_{ref} , es un parámetro básico de la velocidad del viento para definir las clases de WTGS. Otros diseños relacionados a parámetros climáticos son derivados desde la velocidad de referencia y otros parámetros básicos de la clase de WTGS. Una turbina diseñada para una clase WTGS con una velocidad de referencia U_{ref} , es diseñado para soportar clima por los cuales la velocidad del viento promedio extrema de 10 min con un periodo de recurrencia de 50 años a la altura del buco es menor o igual que U_{ref} [1]

El viento de referencia es definida como la media de 10 minutos de la velocidad del viento a la altura del cubo con un periodo de retorno de 50 años [1]

Para incluir sitios donde las condiciones no conforman a ninguna de esas clases, una quinta clase es definida para en la cual los parámetros del viento deben ser definidos por el fabricante (Clase S).

El valor normal de la densidad del aire es especificado como 1.225 Kg/m^3 . Un parámetro crucial para el diseño de la turbina de viento es la intensidad de la turbulencia, la cual es definida como la relación de la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad del viento a la media.

Además de estos parámetros básicos, algunos otros parámetros importantes son requeridos para especificar completamente las condiciones externas empleadas en el diseño de WTGS.

El diseño tener un tiempo de vida al menos de 20 años. Para WTGS de clase S, los fabricantes deberán en describir los modelos usados y los valores esenciales de los parámetros de siendo en la documentación del diseño; y esta deberá contener la documentación mostrada en la siguiente Tabla.

Parámetros de la máquina:	Unidad
Potencia nominal	[kW]
Velocidad del viento de operación a la altura del cubo, $U_{in}-U_{out}$	[m/s]
Tiempo de vida del diseño	[años]
Condiciones de viento:	
Característica de la intensidad de turbulencia como una función de la velocidad media	
Velocidad del viento promedio anual	[m/s]
Distribución de velocidad de viento (Weibull, Rayleigh, medidos, otros)	
Modelo de turbulencia y parámetros	
Velocidades de viento extremo a la altura del cubo V_{e1} y V_{e50}	[m/s]
Modelo de ráfaga extrema y parámetros para un intervalos de recurrencia de 1 y 50 años	
Modelo de cambio de dirección extrema y parámetros para un intervalo de recurrencia de 1 y 50 años	
Modelo de ráfaga extrema coherente y parámetros	
Modelo de ráfaga extrema coherente con cambio de dirección, y parámetros del modelo	
Modelo de viento <i>shear</i> extremo y parámetros	
Condiciones de la red eléctrica:	
Voltaje de suministro normal y rango	[V]
Frecuencia de suministro normal y rango	[Hz]
Desbalance de voltaje	[V]
Máxima duración de salida de servicio de la red	[días]
Numero de salida de servicio de la red	[1/años]
Ciclos de recierre automático (descripción)	
Comportamiento durante fallas externas simétricas y asimétricas (descripción)	
Condiciones ambientales otras (donde son tomadas en cuenta):	
Condiciones de diseño en el caso de WTGS <i>offshore</i> (profundidad del agua, condiciones de olas, etc)	
Rangos de temperatura normal y extremos	[°C]

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del autor. Derechos reservados de autor. Enero 2008. fglongatt@ieec.org

Humedad relativa del aire	[%]
Densidad del aire	[kg/m ³]
Radiación solar	[W/m ²]
Lluvia, rocío, nieve y hielo	
Substancias químicas activas	
Partículas mecánicamente activas	
Descripción del sistema de protección contra descargas atmosféricas	
Parámetros y modelo para terremotos	
Salinidad	[gr/m ³]

Condiciones del Viento

Un WTGS estará diseñado para soportar seguramente las condiciones de viento definidas por la clase seleccionada de WTGS. Los valores de diseño de las condiciones de viento deben ser claramente especificados en la documentación de diseño. El régimen de viento para las consideraciones de carga y seguridad están divididas en condiciones de viento normales, las cuales ocurrirán frecuentemente durante la operación normal de un WTGS, y condiciones de viento extremos, las cuales son definidas para suceder en un periodo de ocurrencia de 1 o 50 años.

En todos los casos la influencia de una inclinación del flujo medio con respecto al plano horizontal de hasta 8 grados será considerado. La inclinación del flujo puede ser asumida que es invariante con la altura.

Condiciones Normales de Viento

Distribución de la Velocidad del Viento

La distribución de velocidad de viento en el sitio es significativa para el diseño de WTGS porque esto determina la frecuencia de presencia de las condiciones de carga individuales.

En el caso del estándar de las clases WTGS, el valor medio de la velocidad de viento sobre un período de tiempo de 10 minutos será asumido que sigue la *distribución de Rayleigh* para los objetivos de cálculos de carga de diseño. En este caso, se da la distribución de probabilidad en la altura de cubo:

$$P_R(V_{hub}) = 1 - e^{-\pi \left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2} \quad (1.1)$$

Modelo Normal del Perfil del Viento (NWP)

El perfil de viento, la $V(z)$, denota la velocidad media del viento como una función de altura, z , encima de la tierra. En el caso de estándar de las clases WTGS, el perfil de velocidad de viento normal será asumido para ser dado según la ley de potencias:

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \quad (1.2)$$

El exponente de ley de potencia α , será asumido para ser 0.2. El perfil de viento asumido es usado para definir el viento promedio vertical que esquilan a través del área barrida por el rotor.

Modelo Normal del Turbulencia (NTM)

La expresión "*la turbulencia del viento*" denota variaciones estocásticas en la velocidad de viento del promedio del 10 minuto. El modelo de turbulencia incluirá los efectos de velocidad de viento que varía, variando la dirección, y el muestreo rotatorio.

Para la clase estándar de WTGS, la densidad de potencia espectral del campo vectorial de la velocidad de viento arbitrario, si usado explícitamente en el modelo o no, debe satisfacer las exigencias siguientes:

- El valor característico de la desviación estándar de la componente longitudinal de la velocidad del viento viene dada por¹:

$$\sigma_1 = I_{15} \frac{(15m/s + aV_{hub})}{a+1} \quad (1.3)$$

Los valores para I_{15} y a son dados en la Tabla 1. Los valores característicos de la desviación, σ_1 , y la intensidad de turbulencia, σ_1/V_{hub} , son mostrados en la Figura 1, como una función de la velocidad del viento para los valores especificados de I_{15} y a . La desviación estándar es asumida que es invariante a con la altura.

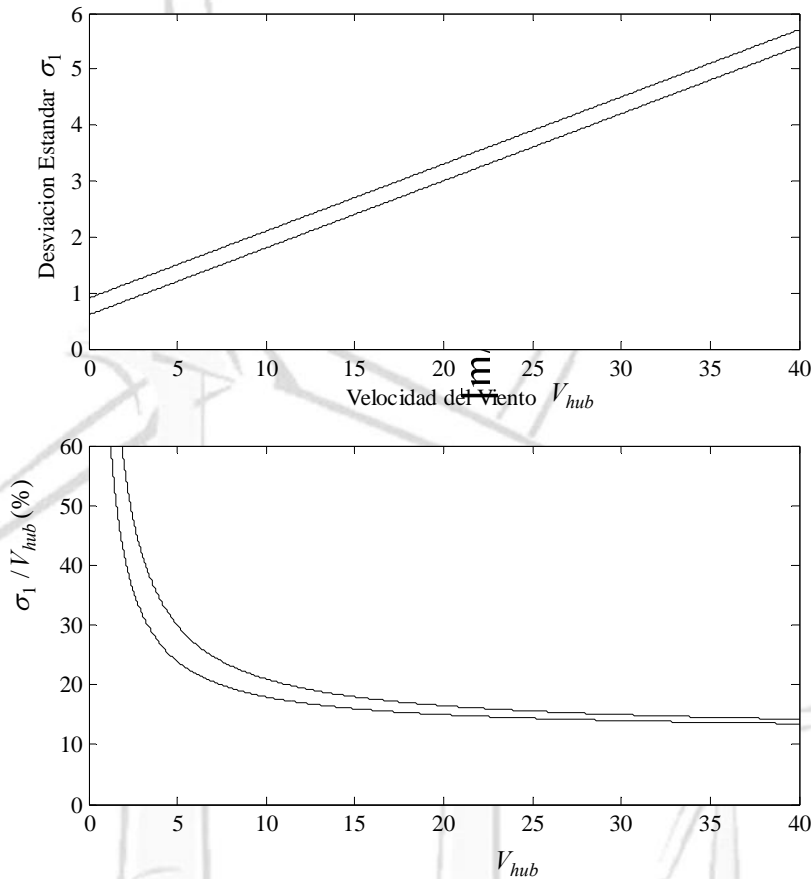


Figura 1. Características de Turbulencia del viento

¹: Para efectuar los cálculos de los casos de carga además de los casos especificados, es apropiado usar diferentes valores percentiles. Tales valores percentiles serán determinado alegrando un valor a la ecuación (7) dado por:

$$\Delta\sigma_1 = (x-1)(2m/s)I_{15}$$

Donde x es determinado de la función de distribución de probabilidad normal.

- b) Hacia el extremo de alta frecuencia del subrango inercial de la densidad espectral de potencia de la componente longitudinal de la turbulencia, $S_1(f)$, se aproximara asintoticamente a la forma:

$$S_1(f) = 0.05(\sigma_1)^2 \left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}} \right)^{\frac{2}{3}} f^{-\frac{5}{3}} \tag{1.4}$$

El parámetro de la escala de turbulencia, Λ_1 , será dado por:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z_{hub} & \text{para } z_{hub} < 30m \\ 21m & \text{para } z_{hub} \geq 30m \end{cases}$$

Las especificaciones para los modelos de turbulencia estocásticos, los cuales satisfacen estos requerimientos son dados en los anexos B y C del IEC 61400 [2]. En el anexo C [2] un modelo determinístico simplificado es dado, y el cual se basado en la descripción estocástica de la turbulencia. Este modelo determinístico puede ser usado cuando se puede demostrar que la respuesta de la para de la turbina de viento a la velocidad de viento muestreada es suficientemente bien atenuado

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del autor. Derechos reservados de autor. Enero 2008. fglongatt@ieeee.org

A

Condiciones de Viento Extremas

Las condiciones de viento extremas son usadas para determinar cargas de viento extremas sobre WTGS. Estas condiciones incluyen velocidades de viento máximas debido a tormentas y cambios rápidos de la velocidad de viento y la dirección.

Estas condiciones extremas incluyen los efectos potenciales de turbulencia de viento de modo que sólo los efectos deterministas tengan que ser considerados en los cálculos de diseño. De acuerdo con la IEC 61400-1, las condiciones extremas de interés son:

1. Modelo de condiciones extremas de velocidad (*Extreme wind speed model*, EWM).
2. Ráfaga operativa extrema (*Extreme operating gust*, EOG).
3. Extremo cambio de dirección (*Extreme direction change*, EDC).
4. *Extreme coherent gust*, ECG.
5. *Extreme coherent gust with direction change*, ECD.
6. *Extreme wind shear*, EWS.

Otras Condiciones Ambientales

Las otras condiciones ambientales (climáticas) además del viento que pueden afectar la integridad y seguridad de un WTGS, por acción térmica, foto-térmica, corrosiva, mecánica, eléctrica y otras acciones físicas. Además, combinaciones de los parámetros climáticos dados pueden incrementar su efecto. Al menos las siguientes condiciones ambientales debe ser tomadas en cuenta y la acción debe ser tomada en la documentación de diseño:

- Temperatura.
- Humedad.
- Densidad del aire.
- Lluvia, rocío, nieve, y hielo.
- Sustancias activas química.
- Partículas mecánicamente activa.
- Descargas atmosféricas.
- Terremotos.
- Salinidad.

En los ambientes fuera de bahía (*offshore*) requiere consideraciones especiales adicionales.

Referencias Documentales

- [1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd. 2001.
- [2] International Electrotechnical Comisión IEC, *IEC 61400-1 Wind turbine generator systems – Part 1 Safety Requirements*.