



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DEFINICIÓN DE COMBINACIONES DE CARGAS SÍSMICAS Y  
OPERACIONALES EN AEROGENERADORES BASADA EN ANÁLISIS NO  
LINEAL MULTICUERPO**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCION INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

**MAXIMILIANO ALEJANDRO CAPRILE GONZÁLEZ**

PROFESOR GUÍA:  
Rafael Ruiz García

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Fabián Rojas Barrales  
Ricardo Herrera Mardones

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA  
Y GEOTÉCNICA  
POR: MAXIMILIANO CAPRILE GONZÁLEZ  
FECHA: 2023  
PROFESOR GUÍA: RAFAEL RUIZ GARCÍA

## **DEFINICIÓN DE COMBINACIONES DE CARGAS SÍSMICAS Y OPERACIONALES EN AEROGENERADORES BASADA EN ANÁLISIS NO LINEAL MULTICUERPO**

Al igual que en el resto del mundo, la industria de la generación eólica ha tenido en Chile un crecimiento explosivo en años recientes. Este desarrollo ha ido por delante de la normativa en términos estructurales y sísmicos de los aerogeneradores, no existiendo a la fecha normativa local que establezca la metodología de combinación de cargas de viento (operacionales) y sísmicas. Se requiere, por tanto, establecer reglas de combinación de cargas sísmicas y operacionales para el diseño estructural de aerogeneradores aplicables al caso de sismos subductivos, considerando especialmente su potencial aplicación en futuros requerimientos normativos en Chile. Dichas reglas se encuentran definidas en la normativa europea y norteamericana, pero no cuentan hasta ahora con suficientes estudios que avalen su aplicabilidad en sismos subductivos como los chilenos.

Conforme a lo anterior, la principal hipótesis a validar en este trabajo es que es posible estimar de manera suficientemente conservadora el comportamiento estructural de aerogeneradores frente a solicitaciones simultáneas de viento y sismo mediante combinaciones distintas a la suma algebraica directa, en particular la raíz de suma de cuadrados SRSS o suma reducida al 75% de cada componente, que entregue seguridad al diseño, sin sobreestimación de las cargas y por ende, del costo de la implementación de estos sistemas, considerando las condiciones particulares asociadas a la ocurrencia de sismos subductivos.

Se estudió el comportamiento de aerogeneradores de torre metálica de 90, 120 y 150 m de altura, representativos de proyectos reales, mediante la aplicación de la metodología multicuerpo no lineal. A la luz de los resultados obtenidos, se tiene que en el total de los casos estudiados, la suma algebraica directa de cargas de sismo y viento (100% + 100%) calculadas independientemente resultó conservadora. En el caso de las combinaciones sismo y viento 75% + 75% y SRSS, se tiene que los resultados son conservadores para una altura de torre no superior a 100 metros, estimándose que por sobre esa altura no es posible establecer que estas regla de combinación sea segura en todos los escenarios de diseño.

A partir de los resultados anteriores, se tiene que la hipótesis principal de esta tesis, correspondiente a la validez de una regla de combinación reducida para cargas de viento y sismo simultánea en aerogeneradores de torre metálica, es aplicable para equipos con altura de *nacelle* menor a 100 metros, siendo válido combinar dichas solicitaciones mediante regla de 75% o raíz de suma de cuadrados. Para alturas mayores a 100 metros, se tiene que la suma algebraica directa (100% sismo + 100% viento) resulta siempre conservadora, pero sin encontrarse evidencia suficiente para sustentar una combinación menor.

# Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto General	1
1.2	Análisis y Modelamiento Estructural en la Práctica Actual	1
1.3	Combinación de Solicitaciones	2
1.4	Análisis Multicuerpo No Lineal	4
1.5	Motivación	6
1.6	Hipótesis	6
1.7	Objetivos	6
	Objetivo General	6
	Objetivos Específicos	6
1.8	Exclusiones	7
<b>Capítulo 2</b>	<b>Descripción General Aerogeneradores</b>	<b>8</b>
2.1	Aspas	9
2.2	Nacelle	10
2.3	Torre	11
2.4	Sistema de Anclaje	12
2.5	Fundación	13
2.6	Modelos de Aerogenerador y Torre a Utilizar en el Análisis	14
<b>Capítulo 3</b>	<b>Respuesta a Solicitaciones de Viento</b>	<b>16</b>
3.1	Definiciones Generales	16
3.2	Variación de la Velocidad del Viento en Altura	17
3.3	Variación de la Velocidad del Viento en el Tiempo – Largo Plazo	18
3.4	Variación de la Velocidad del Viento en el Tiempo – Corto Plazo	19
3.5	Obtención de Series de Tiempo	20
3.6	Definición de Casos de Análisis	21
3.7	Análisis de Resultados	22
	Realización de Velocidades	22
	Corte Basal	24
	Momento Basal	27
<b>Capítulo 4</b>	<b>Respuesta a Solicitaciones Sísmicas</b>	<b>30</b>
4.1	Registros Utilizados	30
4.2	Duración de Registros	32
4.3	Amortiguamiento Estructural	32
4.4	Escalamiento y Casos de Análisis	33

4.5	<b>Resultados</b> .....	33
	Ejemplo Series de Tiempo.....	33
	Comparación de Valores Máximos y Niveles de Confianza en Función de PGA.....	34
<b>Capítulo 5 Respuesta Combinada</b> .....		<b>37</b>
5.1	<b>Escenarios de Análisis (Realizaciones)</b> .....	37
5.2	<b>Consideraciones para Análisis Numérico</b> .....	39
5.3	<b>Procesamiento de Resultados</b> .....	39
5.4	<b>Obtención de Indicadores</b> .....	40
5.5	<b>Resultados</b> .....	42
	Resultados Torre 90 m.....	42
	Resultados Torre 120 m.....	46
	Resultados Torre 150 m.....	49
<b>Capítulo 6 Resumen, Conclusiones y Recomendaciones</b> .....		<b>52</b>
6.1	<b>Resumen y Conclusiones</b> .....	52
6.2	<b>Recomendaciones para Estudios Futuros</b> .....	54
<b>Capítulo 7 Bibliografía</b> .....		<b>55</b>

## **Anexos**

**Anexo A Metodología de Análisis Multicuerpo No Lineal**

**Anexo B Modelamiento y Análisis Estructural**

**Anexo C Tablas Resultados Torre 90 m**

**Anexo D Gráficos Resultados Torre 90 m**

**Anexo E Tablas Resultados Torre 120 m**

**Anexo F Gráficos Resultados Torre 120 m**

**Anexo G Tablas Resultados Torre 150 m**

**Anexo H Gráficos Resultados Torre 150 m**

**Anexo I Ejemplo Referencial Cálculo Espesores Manto Torre Aerogenerador**



# Índice de Tablas

Tabla 1 Características Aerogenerador NREL 5MW [21] .....	15
Tabla 2 Características Torres Metálicas Utilizadas en el Análisis .....	15
Tabla 3 Casos de Análisis Solicitaciones de Viento .....	21
Tabla 4 Selección de Registros Sísmicos para Análisis de Aerogeneradores .....	30
Tabla 5 Duración Significativa Registros Seleccionados .....	32
Tabla 6 Casos de Análisis Solicitaciones Sísmicas .....	33
Tabla 7 Definición Realizaciones para Cada Aerogenerador .....	37
Tabla 8 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia A .....	43
Tabla 9 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia B .....	43
Tabla 10 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia C .....	44
Tabla 11 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) (Resumen Tablas 8-9-10) .....	44
Tabla 12 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento). 44	
Tabla 13 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ ) .....	45
Tabla 14 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) .....	45
Tabla 15 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento) .....	45
Tabla 16 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ ) 45	
Tabla 17 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) 46	
Tabla 18 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento). 47	
Tabla 19 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ ) 47	
Tabla 20 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa) .....	47

<b>Tabla 21 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento).....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 22 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación RSRSS (<math>\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}</math>)</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 23 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa)</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 24 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento).</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 25 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación RSRSS (<math>\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}</math>)</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 26 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación R100 (Suma Algebraica Directa).....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 27 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación R75 (75% Sismo + 75% Viento).....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 28 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación RSRSS (<math>\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}</math>)</b>	<b>50</b>

# Tabla de Figuras

<b>Figura 1 Aerogenerador en Calama, Chile. Modelo Conceptual Análisis Multicuerpo No Lineal. Modelo de Vigas Simplificado “<i>Stick Model</i>” .....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2 Configuración Típica Aerogenerador <i>Onshore</i> de Eje Vertical .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3 Configuración Fuerzas Sobre la Sección de un Aspa. Fuente: Access Science [22].....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 4 Configuración Típica Nacelle Aerogenerador Eje Horizontal. Fuente: Access Science [22] .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 5 Torres de Acero Aerogeneradores, Proyecto en Montaje Norte de Chile</b>	<b>12</b>
<b>Figura 6 Configuración Pernos de Anclaje Torre Aerogenerador .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 7 Configuración Típica Fundación Aerogenerador. Proyecto Implementado en el Norte de Chile .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 8 Ejemplo Variación de Velocidades de Viento en Altura .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 9 Ejemplo de Análisis Estadístico de Velocidades de Viento en un Sitio de Proyecto .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 10 Ejemplo Obtención Serie de Tiempo para Viento a Nivel de Eje mediante TurbSim.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 11 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia A .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 12 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia B.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 13 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia C .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 14 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia A .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 15 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia B .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 16 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia C .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 17 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia A .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 18 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia B.....</b>	<b>28</b>

<b>Figura 19 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia C .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 20 Pseudoespectro Aceleraciones Registros Seleccionados .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 21 Espectro Desplazamientos Registros Seleccionados .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 22 Ejemplo Series de Tiempo Resultados Corte y Momento Basal – Registro Curicó Escalado a 0,4 g (Torre 90 m) .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 23 Valores Máximos y Asociados a Confiabilidad – Corte Basal Registro Curicó para Distintos PGA (Torre 90 m).....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 24 Valores Máximos y Asociados a Confiabilidad – Momento Basal Registro Curicó para Distintos PGA (Torre 90 m) .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 25 Ejemplo Resultado Realizaciones FAST – Solo Sismo, Solo Viento y Análisis Integrado .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 26 Ejemplo Resultados Valores <i>R</i> – Corte Basal con 99% de Confianza para Nivel de Turbulencia A, Turbina NREL 5MW .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 27 Ejemplo Resultados Valores <i>R</i> – Momento Basal con 95% de Confianza para Nivel de Turbulencia A, Turbina NREL 5MW .....</b>	<b>42</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Contexto General

La energía eólica es una de las fuentes renovables de mayor desarrollo reciente a nivel mundial, habiendo crecido más de 75 veces en las últimas dos décadas, tanto en aplicaciones terrestres (*onshore*) como marítimas (*offshore*), conforme a las estadísticas de IRENA [1]. En Chile, el fenómeno es similar, constituyendo a agosto de 2020 el 8,7% del total de potencia instalada en los distintos sistemas del país, según informa la Asociación de Generadoras de Chile [2].

Los aerogeneradores son equipos de catálogo producidos en masa, siendo difícilmente practicable adaptar su diseño a cada sitio debido a economías de escala. Por esta razón, su diseño debe ser estructuralmente seguro, pero además suficientemente económico -esto es, repetible- como para viabilizar los proyectos. En este sentido, un punto clave es la determinación de reglas de combinación adecuadas entre cargas de viento (operacionales) y sísmicas, toda vez que no es posible considerar que son mutuamente exclusivas, pues es esperable algún nivel de viento al momento de ocurrencia del sismo de diseño, ni tampoco que sus valores máximos pueden coincidir, lo que constituiría una doble eventualidad. Si bien es posible desarrollar análisis donde se combinen directamente series de tiempo de viento con registros sísmicos, en la práctica, dada la separación de responsabilidades de diseño entre equipo, torre y fundaciones, el análisis de cargas operacionales se desarrolla en la mayoría de los casos de manera independiente de las solicitaciones sísmicas, debiendo combinarse a posteriori los valores extremos obtenidos.

Conforme a lo anterior, a continuación se presenta una introducción a las metodologías y criterios de análisis de solicitaciones operacionales y sísmicas actualmente empleadas para el diseño estructural de aerogeneradores, y en función de ello, la justificación e hipótesis para el trabajo a desarrollar en esta tesis.

### 1.2 Análisis y Modelamiento Estructural en la Práctica Actual

En la práctica habitual, las solicitaciones de viento sobre aerogeneradores son calculadas por el diseñador del equipo, mediante la metodología de análisis tiempo historia multicuerpo no lineal, en el cual se utiliza un modelo que combina elementos finitos lineales con pequeñas deformaciones representando torre, aspas y equipos mecánicos, compatibilizados mediante *constraints* no lineales, que toman las grandes deformaciones del sistema, incluyendo giros completos de las aspas y deformaciones del orden de 10% en las puntas de las mismas. En este tipo de modelo, el viento es ingresado como series estocásticas, basadas en una velocidad de viento referencial, variable en el tiempo y en la altura de la torre según niveles de turbulencia definidos principalmente en la norma IEC61400 [3]. Este tipo de modelo, aplicado mediante plataformas comerciales como DNV Bladed, plataformas abiertas como FAST u OpenFAST o desarrollos propios de los fabricantes de equipo, representa una simplificación que reduce en órdenes de magnitud los tiempos de análisis requeridos

por modelos de elementos finitos completos (*full FEA*) con análisis hidrodinámico. Como referencia, el estándar DNV-RP-0585 [4] reconoce explícitamente la conveniencia del método de análisis multicuerpo, reconociendo tanto la menor complejidad del análisis como la facilidad de integrar distintos actores (por ejemplo, diseñadores de fundaciones y torres, que en la práctica podrían difícilmente trabajar en un modelo integrado).

De esta manera, se definen distintos casos de carga de viento (que por la naturaleza de los aerogeneradores, son cargas operacionales), dependientes del nivel de variación respecto a la velocidad referencial, como por ejemplo la operación en producción normal (velocidad referencial con turbulencia moderada) o viento extremo (misma velocidad, con mayor turbulencia). La velocidad de viento para diseño pasa a ser entonces una característica de catálogo del equipo, que se compara con las condiciones del sitio proyectado, en lugar de ser estas últimas una entrada directa para el análisis. Los escenarios de carga de viento están definidos de manera consistente en los estándares IEC61400 [3] y ASCE-AWEA RP2011 [5], nombrándose como *Design Load Cases* (DLC), los que incluyen partida operación normal, detención por corto circuito y frenado de emergencia, entre otros.

Las solicitaciones sísmicas pueden determinarse mediante los modelos multicuerpo no lineales antes mencionados, pero mayoritariamente son calculadas mediante análisis modal espectral, presentando este caso dos particularidades. En primera instancia, el modelo típicamente empleado simplifica al aerogenerador, asumiéndolo como una torre de base empotrada, con la masa de los equipos y aspas concentrada en su parte más alta, ignorando la movilidad de grandes componentes. Por otra parte, se asume un amortiguamiento, no propio de disipación estructural, sino resultante del movimiento de las aspas, es decir, hidrodinámico. Este modelo de análisis sísmico simplificado (típicamente llamado *stick model*) es hasta ahora el más utilizado en la práctica, siendo aceptado por la normativa internacional IEC61400 y ASCE-AWEA RP2011, adaptándose a las condiciones locales mediante el uso de espectros de diseño propios del sitio y normativa nacional.

## 1.3 Combinación de Solicitaciones

Si bien es posible desarrollar análisis integrados de sismo y viento, en la práctica profesional, el diseño de la estructura del aerogenerador, sus anclajes y fundaciones son típicamente diseñados a partir de la combinación de estados independientes, desarrollado por equipos de profesionales independientes como se señaló anteriormente.

En términos académicos, la investigación bibliográfica desarrollada para esta tesis se basa principalmente en los trabajos de Prowell: quién desarrolló estudios de solicitaciones combinadas en su tesis de doctorado [6], para luego seguir trabajando en diversas publicaciones científicas con Asareh [7], y Asareh y Mensah [8], los cuales desarrollan diversos análisis comparando análisis integrados con distintas reglas de combinación para solicitaciones independientes. El desarrollo de estos trabajos se basó en análisis tiempo historia integrados mediante metodología propia, que eventualmente pasó a ser el módulo sísmico de la plataforma FAST [9] de NREL. Los sucesivos trabajos de estos autores han concluido que la combinación de cargas sísmicas y operacionales máximas por suma algebraica corresponde a un sobredimensionamiento, debiendo notarse eso sí que en sus trabajos prácticamente se omite la inclusión de registros asociados a sismos subductivos, lo que es una de las justificaciones para el origen de la presente tesis. Se estudió también diversos papers preparados por Ishihara y colaboradores [9, 10], quienes mediante estudios similares a los de Prowell y Asareh también analizan la combinación de sismo y viento mediante análisis tiempo historia.

En términos de normativa, se estudió los principales estándares internacionales y nacionales aplicables a aerogeneradores, según se resume a continuación:

- IEC 61400-1 Edition 4 2019-02. Wind Energy Generation Systems. Part 1: Design Requirements [3], correspondiente al estándar general de diseño de aerogeneradores de la International Electrotechnical Commission (IEC), agencia europea responsable de los primeros desarrollos normativos asociados a aerogeneradores, siendo hasta hoy el principal referente técnico de la industria. Este estándar define en términos generales las solicitaciones de viento, sísmicas, diseño de componentes mecánicos y diseño estructural, estableciendo explícitamente la combinación de solicitaciones sísmicas y operacionales mediante una regla SRSS. Debe mencionarse que este estándar cita los trabajos de Prowell para este efecto.
- IEC 61400-6 Edition 1 2020-04. Wind Energy Generation Systems. Part 6: Tower and Foundation Design Requirements [10], correspondiente a los requerimientos de diseño estructural. Este documento no tiene definiciones explícitas de solicitaciones de viento o sísmicas, centrándose en la filosofía de diseño (estados de serviceabilidad y cargas últimas) y requisitos de cálculo de fundaciones y torres de acero que principalmente se basan en el Eurocódigo.
- El estándar ASCE-AWEA RP2011 Recommended Practice for Compliance of Large Land-based Wind Turbine Support Structures [5] es la contraparte norteamericana de la normativa IEC. A diferencia de otras normas estructurales, este estándar ASCE se basa casi completamente en el documento europeo, citándolo y validándolo directamente. En particular, este estándar también reconoce la no simultaneidad de cargas máximas sísmicas y operacionales, recomendando su combinación mediante una regla de 75% para cada estado. Al igual que la documentación IEC, este estándar hace cita directa a los trabajos de Prowell.
- La agencia DNVGL es la principal instancia certificadora de aerogeneradores, y en tal capacidad, ha publicado diversos documentos que citan al estándar IEC61400, sin agregar definiciones técnicas adicionales, como por ejemplo DNVGL-ST-0126 Support Structures for Wind Turbines [11], DNVGL-SE-0190 Project Certification of Wind Power Plants [12] y DNVGL-SE-0437. Load and Site Conditions for Wind Turbines [13]. Recién el año 2021 esta agencia publicó el borrador del estándar DNVGL-RP-0585 Seismic Design of Wind Power Plants [4], el que por primera vez menciona explícitamente el uso de modelos multicuerpo para análisis integrado de viento y sismo, y además, por primera vez establece requisitos sísmicos sobre componentes, los cuales habían sido omitidos por los estándares citados anteriormente, los que se limitaban a torre, anclaje y fundaciones.
- El trabajo de Ishihara y sus colaboradores [14] ha sido la base para la actualización del estándar japonés para diseño de aerogeneradores JSCE - Guidelines for Design of Wind Turbine Support structures and foundations [15]. En este estándar se mantienen las reglas de combinación establecidas por IEC, centrándose en la definición de espectros que corrijan la participación de modos superiores, que puede verse artificialmente reducida al emplear modelos simplificados.
- El Capítulo 3 del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad Mexicana [16] incluye desde 2015 una sección para diseño sísmico de aerogeneradores. En este documento se define una metodología de análisis sísmico espectral similar a la de

IEC61400 o ASCE-AWEA RP2011, sin definir combinaciones específicas de solicitaciones sísmicas y operacionales.

- El estándar ETG-1015 Especificaciones Técnicas Generales Diseño Sísmico [17] fue desarrollado por ENDESA durante la década de los 80 para establecer requisitos de diseño a instalaciones de generación eléctrica. Si bien este documento no menciona estructuras asimilables a aerogeneradores, y define un espectro de diseño que sólo llega hasta los 2,5 segundos (pudiendo los aerogeneradores modernos llegar, en equipos actualmente instalados en Chile, a más de 7 segundos de periodo), es hasta hoy exigido por parte de la Comisión Nacional de Energía. Se consulta, por tanto, sólo como referencia, siendo su aplicación incorrecta en la práctica profesional nacional justamente uno de los motivos que dan origen a esta tesis. Cabe destacar que este estándar considera la suma algebraica directa de cargas operacionales y de sismo.
- La norma NCh.2369 Of.2003 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales [18] excluye explícitamente a las instalaciones de generación de energía. Su estudio es por tanto solamente referencial, siendo pertinente mencionar que su nueva versión, en etapa de comité al momento del desarrollo de esta tesis, si incluirá un capítulo especialmente dedicado al diseño sísmico de aerogeneradores. El autor de esta tesis participó en el comité encargado del desarrollo del capítulo de aerogeneradores.

## 1.4 Análisis Multicuerpo No Lineal

Como se mencionó anteriormente, el análisis estructural de aerogeneradores, para cargas de viento y sismo, requiere el uso de una metodología que dé cuenta de las no linealidades propias de la operación y materialidad de los equipos, los que tienen componentes que no sólo giran en torno a varios ejes, sino que también tienen deformaciones que pueden llegar al 10% de la longitud, como en el caso de las aspas. Cabe mencionar que en la práctica profesional de diseño sísmico, se utiliza habitualmente la simplificación del aerogenerador a una torre en voladizo con el total de la masa de los componentes rotatorios concentrada en un punto (*stick model*). Este modelamiento simplificado se establece en la metodología descrita por la normativa de diseño de aerogeneradores tanto europea [10] como norteamericana [5].

Para efectos de estudiar esta metodología en términos generales, se estudió principalmente la tesis de doctorado de Holm-Jørgensen [19], *Nonlinear Multibody Dynamics of Wind Turbines* describe detalladamente la metodología de análisis multicuerpo no lineal, adaptada particularmente al caso de aerogeneradores. Si bien la presente tesis no tiene entre sus objetivos la implementación de la metodología en rutinas propias, se utiliza el trabajo de Holm-Jørgensen para el entendimiento cabal del concepto de análisis multicuerpo no lineal, particularmente en lo relacionado a reducción de grados de libertad de un sistema complejo (aerogenerador bajo solicitaciones hidrodinámicas) a un sistema simplificado. Este sistema simplificado se compone, entonces, mayoritariamente de elementos tipo vigas propios del análisis estructural tradicional, compatibilizados mediante *constraints* cinemáticos que permiten simular el comportamiento global del conjunto, lo cual no es posible mediante software estructural típico, al tratarse de un mecanismo.

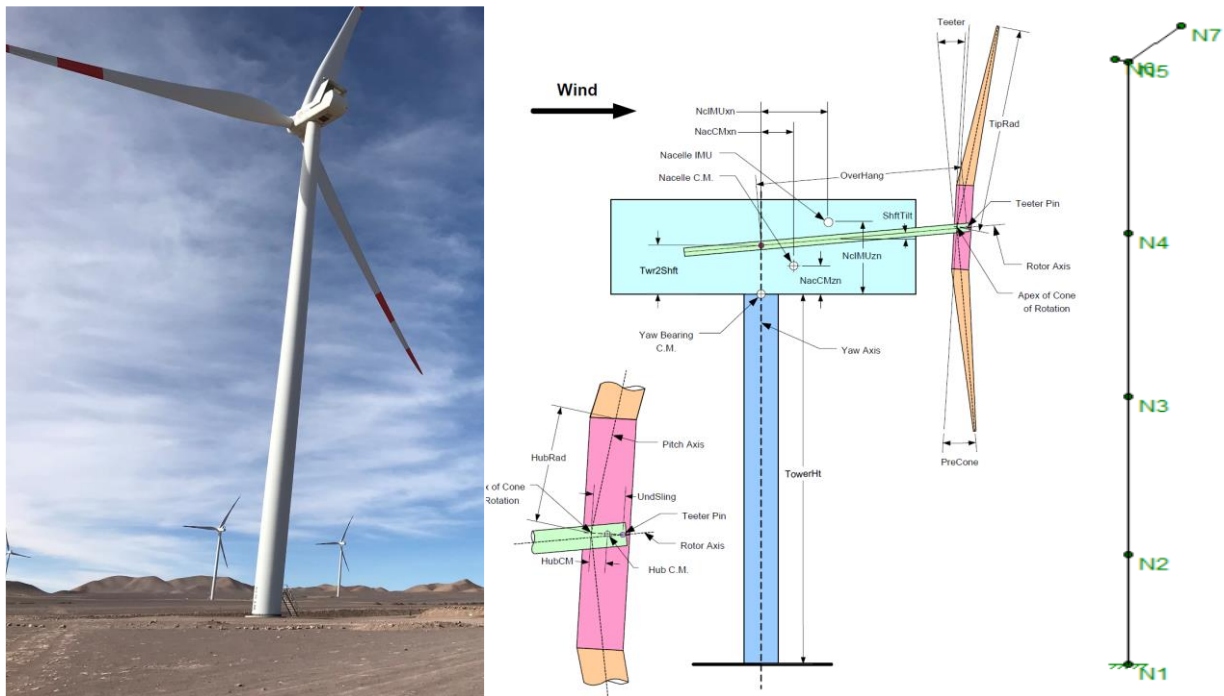
El National Renewable Energy Laboratory es la principal institución norteamericana dedicada a la investigación en el campo de la generación eólica, siendo la creadora del software FAST a utilizar



en esta tesis. Si bien la institución tiene una vasta biblioteca publicada, para efectos del trabajo en esta tesis, se consultaron principalmente los documentos descritos a continuación.

- FAST User's Guide [20] (Jonkman, J., Buhl, M.). Corresponde al manual de uso de la plataforma FAST, incluyendo no sólo las instrucciones para funcionamiento, sino además una detallada descripción teórica del modelo multicuerpo que utiliza.
- Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development [21] (Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G.). En este documento se define completamente un aerogenerador teórico con una capacidad de generación nominal de 5 MW, el cual será utilizado como modelo base en esta tesis. El uso de este aerogenerador se justifica, por una parte, en el respaldo académico que implica considerar un equipo utilizado en una serie de publicaciones (algunas mencionadas en este capítulo), y por otra en la imposibilidad de utilizar datos de aerogeneradores reales, toda vez que sus características, particularmente materialidad y geometría de aspas, corresponden a propiedad intelectual severamente resguardada.

La Figura 1 muestra la configuración real de un aerogenerador, y las representaciones conceptuales para los modelos de análisis multicuerpo y *stick model*, pudiéndose apreciar la diferencia en la complejidad del modelo de análisis.



**Figura 1 Aerogenerador en Calama, Chile. Modelo Conceptual Análisis Multicuerpo No Lineal. Modelo de Vigas Simplificado “Stick Model”.**

## 1.5 Motivación

Si bien es intuitivo que los valores máximos de sismo y viento no se sumen directamente para efectos de diseño estructural, al ser eventos por definición variables en el tiempo, se considera razonable revisar la aplicabilidad de las reglas de combinación propuestas en la normativa internacional para sismos subductivos, particularmente chilenos. Lo anterior tiene un impacto directo en el costo del proyecto, pudiendo variar aproximadamente 9% sólo en el ítem de acero del manto, según se ejemplifica en el Anexo G de esta tesis.

De acuerdo con lo señalado, se estima necesario validar las reglas de combinación de cargas sísmicas y operacionales para el diseño estructural de aerogeneradores en el caso de sismos subductivos, considerando especialmente su potencial aplicación en futuros requerimientos normativos en Chile.

## 1.6 Hipótesis

La principal hipótesis a validar es que es posible estimar de manera suficientemente conservadora el comportamiento estructural de aerogeneradores frente a sollicitaciones simultáneas de viento y sismo mediante combinaciones distintas a la suma algebraica directa, en particular la raíz de suma de cuadrados SRSS o suma reducida al 75% de cada componente, que entregue seguridad al diseño, sin sobreestimación de las cargas y por ende, del costo de la implementación de estos sistemas, considerando las condiciones particulares asociadas a la ocurrencia de sismos subductivos.

## 1.7 Objetivos

### Objetivo General

El objetivo general del trabajo es proponer reglas de combinación para sollicitaciones de sismo (considerando particularmente fuentes subductivas, como las propias de los terremotos chilenos) y operacionales a emplear en el diseño estructural de aerogeneradores *onshore* con torre de acero, permitiendo utilizar valores calculados independientemente para cada estado, en un diseño seguro y económicamente viable, esto es, sin recurrir a criterios excesivamente conservadores.

### Objetivos Específicos

En función de cumplir el objetivo general antes planteado, la presente tesis tiene los siguientes objetivos específicos:

- Definición de una metodología para el análisis del comportamiento estructural de aerogeneradores bajo cargas operacionales, asociadas a viento.
- Definición de una metodología para el análisis del comportamiento estructural de

aerogeneradores bajo solicitaciones sísmicas.

- Definición de una metodología para el análisis del comportamiento estructural de aerogeneradores, bajo solicitaciones simultáneas viento y sismo.
- Proponer una regla de combinación distinta a la suma algebraica directa para el diseño estructural de aerogeneradores mediante la obtención de índices cuantitativos basados en conceptos probabilísticos.

## 1.8 Exclusiones

El trabajo a desarrollar no considera los siguientes aspectos:

- Estudio de aerogeneradores con torre de hormigón armado o híbrida (acero-hormigón).
- Estudio de excitaciones sísmicas en 3 dimensiones de manera simultánea.
- Estudio de interacción suelo-fundación-estructura.
- Estudio de aerogeneradores marinos (*offshore*).

# Capítulo 2

## Descripción General Aerogeneradores

En este capítulo se presenta una descripción general de la configuración del sistema mecánico y estructural de aerogeneradores de 3 aspas *onshore* de eje horizontal con torre de soporte de acero, a los cuales se limita el alcance de la tesis. La Figura 2 presenta la distribución típica de componentes, la cual se elabora en mayor detalle en los párrafos posteriores.



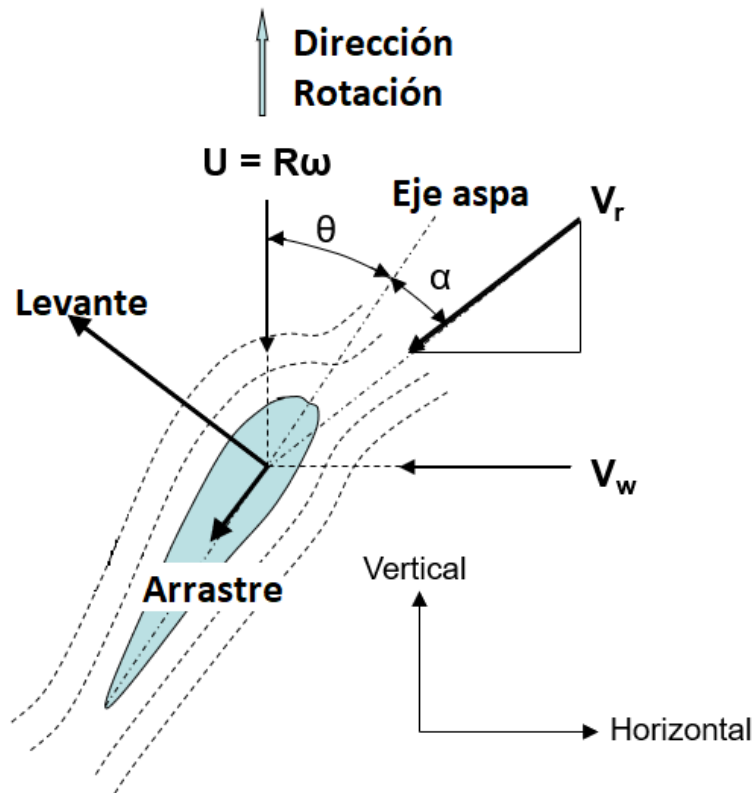
**Figura 2 Configuración Típica Aerogenerador *Onshore* de Eje Vertical**

A la fecha de preparación de este trabajo, existen aerogeneradores instalados en Chile con alturas de eje de *nacelle* que superan los 140 metros, con aspas que superan los 50 metros de largo. A nivel mundial, se están prototipando aerogeneradores con altura de eje sobre los 200 metros, con aspas cercanas a los 100 metros de largo.

Cabe destacar que los aerogeneradores son estructuras extremadamente flexibles, teniéndose a manera de ejemplo que la torre aerogenerador real instalado en Chile, con altura de eje de 140 metros, tiene un periodo natural calculado del orden de 7 segundos, mientras que un edificio habitacional de similar altura tendría un periodo en el rango de 4 segundos.

## 2.1 Aspas

Las aspas son los componentes que en primera instancia captan la energía del viento, convirtiéndola en movimiento rotacional mediante una configuración que aprovecha el arrastre y levante (*drag and lift*) del viento sobre una sección asimétrica, es decir, haciendo uso del efecto Bernoulli de la misma forma en que las alas de un avión permiten su vuelo. La Figura 3 esquematiza el funcionamiento antes descrito:



**Figura 3 Configuración Fuerzas Sobre la Sección de un Asa. Fuente: Access Science [22]**

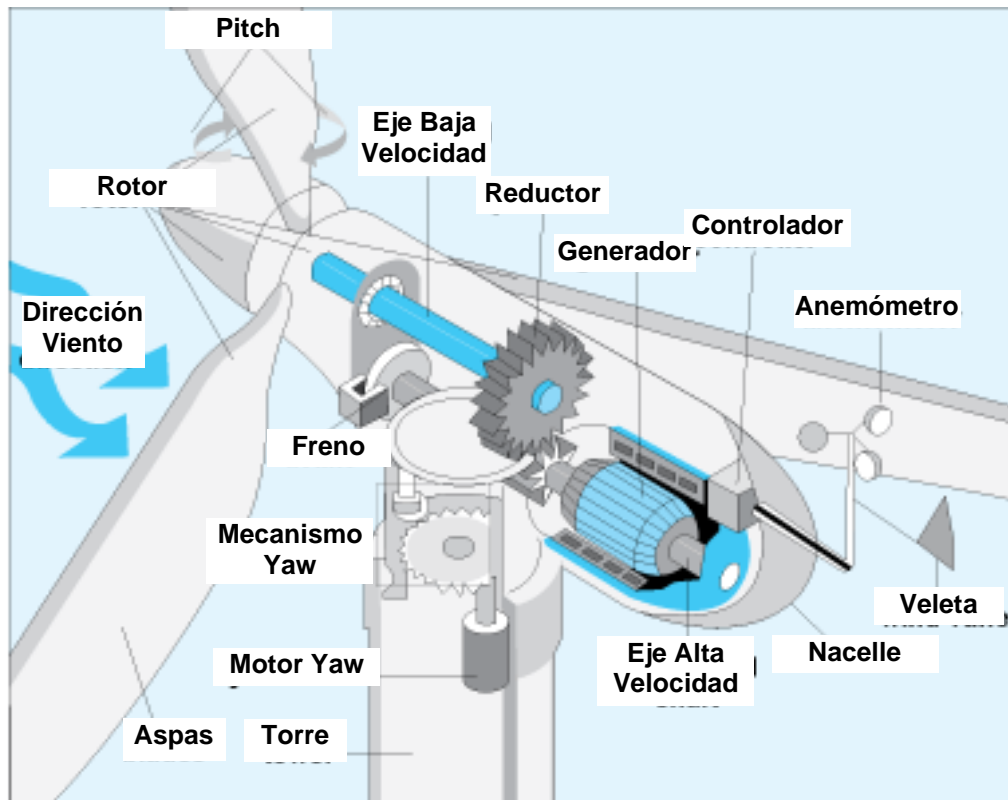
Si bien el alcance de la presente tesis no incluye el análisis fluidodinámico de los aerogeneradores, para efectos de diseño estructural y sísmico es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las aspas en aerogeneradores modernos están fabricadas a partir de una mezcla de elementos metálicos y resinas plásticas, siendo justamente esta composición parte de los diseños protegidos intelectualmente por los distintos tecnólogos. Esta configuración está diseñada para minimizar la masa rotatoria del sistema, teniendo un nivel de flexibilidad tal que las deformaciones a lo largo del asa, especialmente en su punta, pueden ser lo suficientemente grandes para que el supuesto de pequeñas deformaciones para considerar que su comportamiento es lineal no sea válido.
- En aerogeneradores modernos, las aspas pueden girar en torno a su propio eje (*pitch*), mediante un accionamiento controlado por el sistema de operación del equipo. Esto hace que se pueda

optimizar el ángulo de ataque ( $\theta$  en la Figura 3) de manera de maximizar la generación de energía en cada momento, y además proteger al equipo en vientos por sobre el nivel operacional, es decir, que dado un determinado umbral de velocidad de viento, las aspas se posicionen de forma de minimizar la rotación. Esto implica que los esfuerzos de diseño para aspas y torre asociados a vientos extremos no suelen ser muy superiores a los asociados a las condiciones operacionales normales, lo que puede ser contraintuitivo, pues podría suponerse que las cargas de tormenta en un equipo asociado a viento son siempre las que controlan el diseño.

## 2.2 Nacelle

El recinto que alberga los componentes electromecánicos de un aerogenerador de eje horizontal se denomina *nacelle* o góndola, teniendo típicamente la configuración esquematizada en la Figura 4:



**Figura 4 Configuración Típica Nacelle Aerogenerador Eje Horizontal. Fuente: Access Science [22]**

Los principales elementos que conforman un *nacelle* típico son:

- Rotor, correspondiente al conjunto central de las 3 aspas. Además de conectar estos elementos al generador, en aerogeneradores modernos se tiene el sistema de giro en torno al eje de las aspas (*pitch*) descrito anteriormente.
- Eje de baja velocidad, correspondiente al eje principal, con igual velocidad angular que el rotor.

El rotor se soporta sobre descansos (*bearings*) que como se detalla más adelante en este trabajo, son modelados como *constraints* cinemáticos.

- Reductor. La configuración típica de aerogeneradores incluye un reductor (caja de cambios) que permite transformar el giro del rotor a mayor velocidad, para accionar al generador eléctrico con una velocidad de giro optimizada. Cabe destacar que existen aerogeneradores de accionamiento directo (*direct drive*) donde el eje principal acciona directamente al generador.
- Generador, correspondiente al equipo que transforma el giro de las aspas en energía eléctrica.
- Sistema de guiñada (*yaw*). Este sistema permite alinear a toda la nacelle continuamente con respecto a la dirección predominante del viento, de manera de maximizar la energía generada. El sistema se compone de un motor y un engranaje que permite el giro.

En complemento a los componentes principales antes mencionados, los aerogeneradores cuentan con sistemas de medición de viento, aceleraciones y en general un sistema de control que permite manejar la orientación (*yaw*) del equipo, posición de aspas (*pitch*) y accionar el freno, conforme a una lógica predeterminada, implementada en tiempo real.

## 2.3 Torre

La torre de soporte de los aerogeneradores puede tener distintas configuraciones, desde estructuras enrejadas similares a sistemas de transmisión eléctrica, a torres conformadas por cilindros de hormigón pretensado, acero o incluso configuraciones híbridas. Para el presente trabajo, se considera únicamente torres de acero, las cuales son a la fecha la configuración más usada a nivel mundial. Las torres se componen de tramos cilíndricos de espesor variable, unidos entre sí mediante bridas con pernos de alta resistencia. Para efectos de análisis y diseño, se considera de manera especial la concentración de esfuerzos en las bridas, así como también la singularidad que representa la existencia de una puerta de acceso.

La Figura 5 muestra a continuación un conjunto de fotografías que ilustran la configuración de torres de acero, en montaje en un proyecto en el norte de Chile (fotografías propias).





**Figura 5 Torres de Acero Aerogeneradores, Proyecto en Montaje Norte de Chile**

## **2.4 Sistema de Anclaje**

El sistema de anclaje hasta la fecha tradicional para aerogeneradores de torre metálica corresponde a una jaula de pernos (*anchor cage*), correspondiente a un arreglo de dos círculos de pernos concéntricos, sobre el cual se soporta la brida del tramo inferior de la torre, quedando de tal forma un círculo de pernos por el interior de la torre y otro por su exterior. Respecto a los pernos de anclaje, se destacan tres aspectos:

- A diferencia de la práctica industrial chilena, los pernos de torres normalmente no consideran silla.
- Los aceros utilizados (típicamente ASTM A490 grado 10.9 o de mayores resistencias) no necesariamente cumplen los requisitos de relación ductilidad propios de elementos sísmicos, lo cual debe considerarse en la selección de los factores de reducción de respuesta  $R$  a considerar en su análisis.
- Los pernos de anclaje suelen ser pretensados, de manera de asegurar compresión total en todo el perímetro de la torre para al menos las cargas operacionales contempladas en el diseño.

La Figura 6 muestra fotografías (fuente propia) que ilustran una configuración existente de jaula de anclaje en un proyecto implementado en el norte de Chile.





**Figura 6 Configuración Pernos de Anclaje Torre Aerogenerador**

## 2.5 Fundación

Las fundaciones para aerogeneradores *onshore* corresponden típicamente a estructuras de hormigón armado correspondientes a troncos cónicos, con esquemas de anclaje al suelo basal diseñado en función de las condiciones locales, como por ejemplo apoyo directo, pilotes o esquemas de mejoramiento de suelo, usualmente conformados a partir de columnas de grava.

Si bien el alcance de esta tesis no incluye el análisis o diseño geotécnico de fundaciones, se destacan los siguientes aspectos a tener en cuenta:

- La rigidez del sistema de anclaje debe ser adecuadamente incorporada al modelo de análisis del conjunto. Esto puede ser implementado desde un extremo correspondiente a considerar directamente empotrada la torre, a un modelo de elementos finitos 3D que permita analizar la interacción suelo estructura. Debe considerarse que dadas las dimensiones de las fundaciones (diámetros del orden de 30 metros) y sus espesores, no es posible clasificarlas directamente como rígidas, no siendo aplicables las expresiones de resortes equivalentes en función de constantes de balasto encontradas habitualmente en la literatura de fundaciones para equipos rotatorios.
- El modelamiento del amortiguamiento del sistema resulta complejo, al existir una componente hidrodinámica (giro de las aspas en el aire), de amortiguamiento de la torre y la asociada a la disipación del suelo.

- Existen configuraciones de fundaciones con núcleo flexible, protegidas mediante patentes.

Lo anterior es aplicable únicamente a las fundaciones de aerogeneradores *onshore*. En aplicaciones marítimas, se puede encontrar otros tipos, como fundaciones de pilote único o incluso flotantes.

La Figura 7 muestra una fotografía de fuente propia, con una configuración típica de fundación para aerogeneradores.



**Figura 7 Configuración Típica Fundación Aerogenerador. Proyecto Implementado en el Norte de Chile**

## **2.6 Modelos de Aerogenerador y Torre a Utilizar en el Análisis**

Se utilizará el aerogenerador NREL de 5 MW [21], dado que su configuración es información de dominio público, y además ha sido utilizado en diversa bibliografía, como por ejemplo en los trabajos de Prowell [6] y Asareh [8] según se detalla en el Capítulo 1 de esta tesis. Con el objetivo de generalizar los resultados, se utilizará el mismo equipo (*nacelle*, rotor y aspas) con torres de distinta altura, lo cual resulta consistente con la práctica profesional, en la cual se utiliza un modelo de aerogenerador -fabricado en serie- con distintas torres que permitan adaptarse a las condiciones locales. Se considera que este enfoque es suficientemente representativo para el espectro de aplicaciones de aerogeneradores de torre metálica, no cubriendo -eso sí- opciones de torre de hormigón o configuraciones híbridas (hormigón-acero). A continuación, se definen las características del aerogenerador y torres utilizadas.

**Tabla 1 Características Aerogenerador NREL 5MW [21]**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Potencia nominal	5 MW
Tipo	Eje horizontal, 3 aspas
Velocidad nominal de viento	11,4 m/s
Diámetro del rotor	126 m
Peso del rotor	111 t
Peso del <i>nacelle</i>	240 t

**Tabla 2 Características Torres Metálicas Utilizadas en el Análisis**

<b>Parámetro</b>	<b>Torre NREL<sup>7</sup></b>	<b>Torre 120 m</b>	<b>Torre 150 m</b>
Peso torre	258,6 t	315,3 t	519,1 t
Altura torre (bajo eje)	87,6 m	117,6 m	147,6 m
1er periodo longitudinal	3,13 s	7,70 s	8,59 s
1er periodo transversal	3,23 s	7,69 s	8,58 s
2do periodo longitudinal	0,34 s	0,87 s	1,20 s
2do periodo transversal	0,34 s	0,86 s	1,20 s

# Capítulo 3

## Respuesta a Solicitaciones de Viento

Si bien el eje principal de la tesis está centrado en los aspectos sísmicos, dada la naturaleza de los aerogeneradores, el estudio inevitablemente debe incluir una adecuada comprensión de las sollicitaciones asociadas a viento, que en este caso, corresponden a operación en nominal de los equipos. A diferencia del caso típico en que viento y sismo son condiciones eventuales, y por tanto mutuamente excluyentes, el análisis de aerogeneradores requiere la consideración permanente del viento como una carga dinámica. A continuación, se definen los principales conceptos a utilizar en la incorporación de sollicitaciones de viento al análisis de aerogeneradores.

### 3.1 Definiciones Generales

Para efectos de uniformar conceptos, se consideran las siguientes definiciones conforme al estándar IEC61400-1 [3]:

- $V_{ave}$ : velocidad media del viento anual, evaluada a partir de mediciones medias cada 10 minutos (es decir, la velocidad registrada en 10 minutos es el promedio de ese lapso, no el máximo). Es una propiedad del sitio, no del aerogenerador.
- $V_r$ : velocidad nominal (*rated*). Corresponde a la velocidad estable del viento a la cual el aerogenerador produce su potencia nominal. Es una propiedad del equipo, no del sitio.
- $V_{in}$ : velocidad de entrada. Corresponde a la velocidad mínima en la cual el aerogenerador opera. Es una propiedad del equipo y su configuración, no del sitio.
- $V_{out}$ : velocidad de salida. Corresponde a la velocidad máxima a la cual el aerogenerador puede operar, es decir, aquella en la cual se activan los sistemas de freno. Cabe destacar que como los aerogeneradores tienen un diseño que optimiza la captación de energía eólica, la velocidad nominal  $V_r$  es cercana a  $V_{out}$ , y no un valor intermedio entre  $V_{in}$  y  $V_{out}$ . Es una propiedad del equipo y su configuración, no del sitio.
- Turbulencia: se define como la variación estocástica de la velocidad del viento en torno a un valor medio. El valor medio corresponde a un periodo de análisis (usualmente 10 minutos), sin corresponder a la media anual del sitio. Cabe destacar, por tanto, que el término turbulencia en este contexto es únicamente un concepto estadístico, sin relacionarse con conceptos físicos como vórtices en torno a bordes de aspas.

### 3.2 Variación de la Velocidad del Viento en Altura

Independiente de su variación temporal, se considera que la velocidad del viento varía en altura, utilizándose frecuentemente ecuaciones logarítmicas o de potencia. El estándar IEC 61400 [3] define dos opciones:

Variación logarítmica:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad [\text{Ec. 3.2-1}]$$

Variación de potencia:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad [\text{Ec. 3.2-2}]$$

Donde  $V$  corresponde a la velocidad de viento calculada,  $z_r$  corresponde a la altura de referencia donde se mide la velocidad media,  $z_0$  corresponde a la altura del nivel basal, y  $\alpha$  corresponde a un parámetro de potencia. En este trabajo, de manera consistente con la mayoría de la literatura consultada, se utiliza la variación de potencia. Debe considerarse que la variación de velocidad en altura resulta significativa en el análisis, dado que el diámetro del rotor completo en el aerogenerador analizado tiene 126 m, por lo que en un determinado instante, la carga de viento sobre un aspa que está abajo es muy inferior a la del aspa que está arriba.

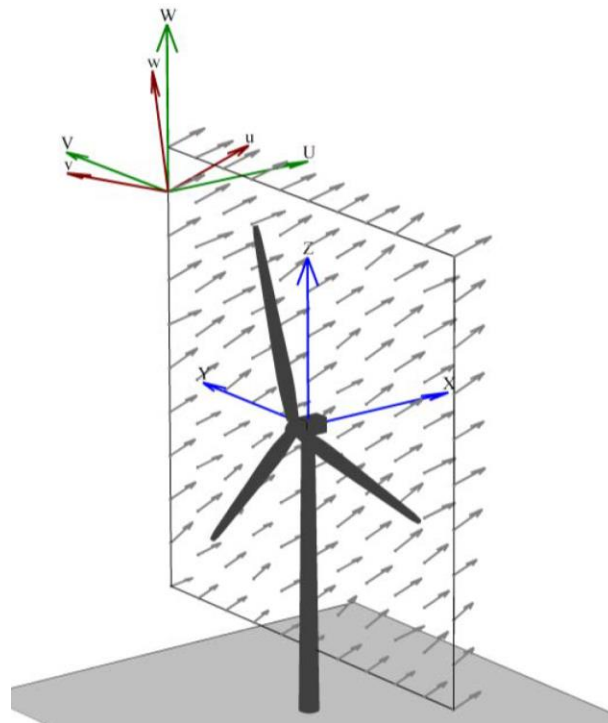


Figura 8 Ejemplo Variación de Velocidades de Viento en Altura

### 3.3 Variación de la Velocidad del Viento en el Tiempo – Largo Plazo

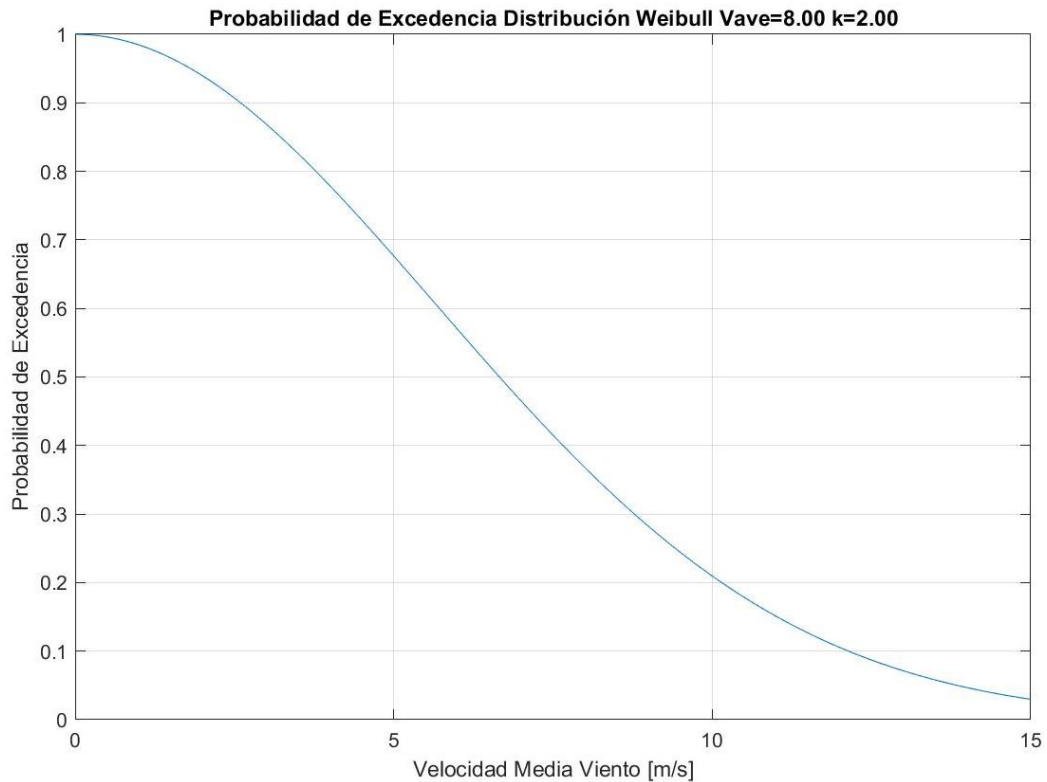
La literatura estudiada, en particular IEC61400 [3], considera que la variación de la velocidad del viento es una composición de variación en largo plazo (anual) con una variación de corto plazo (10 minutos), teniéndose definiciones estadísticas complementarias.

En el caso de la variación de largo plazo, se considera como principal parámetro la velocidad media anual del sitio ( $V_{ave}$ ), antes definida, asumiéndose según IEC61400 [3], que esta variación es representable según una distribución de Weibull, según se define en las siguientes expresiones para función de distribución de probabilidad  $f$  y de probabilidad acumulada  $F$  para un determinado valor de velocidad  $v$ , con un parámetro de forma  $k$ :

$$f(v) = \frac{k}{V_{ave}} \left(\frac{v}{V_{ave}}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{V_{ave}}\right)^k\right) \quad [\text{Ec. 3.3-1}]$$

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{V_{ave}}\right)^k\right) \quad [\text{Ec. 3.3-2}]$$

A manera de ejemplo, con las expresiones anteriores, se tiene la siguiente curva de probabilidad de excedencia para la velocidad del viento, utilizando la ecuación 3.3-2 para una velocidad media anual  $V_{ave}$  de 8 m/s y un parámetro de forma  $k=2$ .



**Figura 9 Ejemplo de Análisis Estadístico de Velocidades de Viento en un Sitio de Proyecto**

Con los parámetros anteriores, se tendrá una probabilidad de aproximadamente 20% de excedencia para una velocidad de 10 m/s, y aproximadamente de 10% de excedencia para una velocidad de 12 m/s. Este trabajo considera una serie de escenarios donde se asume que una determinada velocidad media ya ocurre, y por tanto, la consideración de esta probabilidad de excedencia es un grado adicional de resguardo, que conservadoramente se omite.

### 3.4 Variación de la Velocidad del Viento en el Tiempo – Corto Plazo

La variación de velocidad en el corto plazo (dentro de 10 minutos), se considera como una distribución estocástica respecto a una media, que no necesariamente coincide con la media anual, sino que corresponde al valor de interés para el análisis. En este trabajo, se considerará un total de 7 casos de velocidad media.

La variación de corto plazo se modela conforme a un modelo de turbulencia, basado en un espectro de densidad de potencia. El modelo más usado, incluyendo IEC61400 [3] es del de Kaimal, el cual se aplica en este trabajo.

Las densidades de potencia espectral para las tres direcciones principales (1: longitudinal, 2: transversal, 3: vertical) se definen como:

$$S_1(p) = 0,05\sigma_1^2(\Lambda_1/V_{hub})^{-2/3}p^{-5/3} \quad [\text{Ec. 3.4-1}]$$

$$S_2(p) = S_3(p) = \frac{4}{3}S_1(p) \quad [\text{Ec. 3.4-2}]$$

Donde:

- $p$  : frecuencia
- $S_k$  : Espectro de la componente de velocidad, donde el subíndice  $k$  toma valor 1 para la dirección principal del viento, y valores 2 y 3 para las direcciones ortogonales.
- $\sigma_k$  : desviación estándar de la componente de velocidad, donde el subíndice  $k$  toma valor 1 para la dirección principal del viento, y valores 2 y 3 para las direcciones ortogonales.
- $V_{hub}$  : velocidad media de interés para la ventana de análisis
- $\Lambda_l$  : parámetro de escala longitudinal, dado por
  - $0,7 \cdot z$  para  $z < 60$  m
  - 42 para  $z > 60$  m

La desviación estándar para la dirección longitudinal  $\sigma_1$ , se define en función de la Característica de Turbulencia y su correspondiente valor de referencia  $I_{ref}$ , parámetros que corresponden a características que definen al modelo de aerogenerador:

- Característica de Turbulencia A: turbulencia alta (Iref: 0,16)
- Característica de Turbulencia B: turbulencia media (Iref: 0,14)
- Característica de Turbulencia C: turbulencia baja (Iref: 0,12)

Con los parámetros anteriores, se define la desviación estándar para la componente longitudinal como:

$$\sigma_1 = I_{ref}(0,75 \cdot V_{hub} + 5,6) \text{ [m/s]} \quad [\text{Ec. 3.4-3}]$$

Las desviaciones para las dos restantes direcciones se obtienen como:

- $\sigma_2$ : transversal =  $0,7 \cdot \sigma_1$
- $\sigma_3$ : vertical =  $0,7 \cdot \sigma_1$

Finalmente, se tiene que para definir una serie de tiempo de velocidades de viento, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Definir altura de eje (*hub*), lo que define el parámetro de escala. En este caso, corresponderá a la altura del centro del rotor para las 3 configuraciones de torre analizada.
- Definir una velocidad media para la ventana de análisis (en el caso de este trabajo, se considerarán 7 casos: 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 m/s). Debe notarse que este rango de velocidades es relevante, toda vez que es representativo de valores medios esperables en la operación.
- Definir una característica de turbulencia para el modelo de aerogenerador analizado (en este trabajo, se considerará las 3 características de turbulencia posibles, A-B-C, definidas conforme al estándar IEC64100).
- Generar numéricamente la serie de tiempo, tal que su densidad de potencia calce con el modelo de Kaimal, lo que se lleva a cabo mediante el programa TurbSim [23].

Las definiciones presentadas corresponden a lo indicado por el estándar IEC61400 [3] para un Modelo de Turbulencia Normal (NTM correspondiente a la operación esperable coincidente con sismo. En este trabajo no se consideran los modelos de turbulencia extrema (ETM), los que no se combinan con sismo, dado que corresponden a casos de tormentas y/o viento extremo.

### 3.5 Obtención de Series de Tiempo

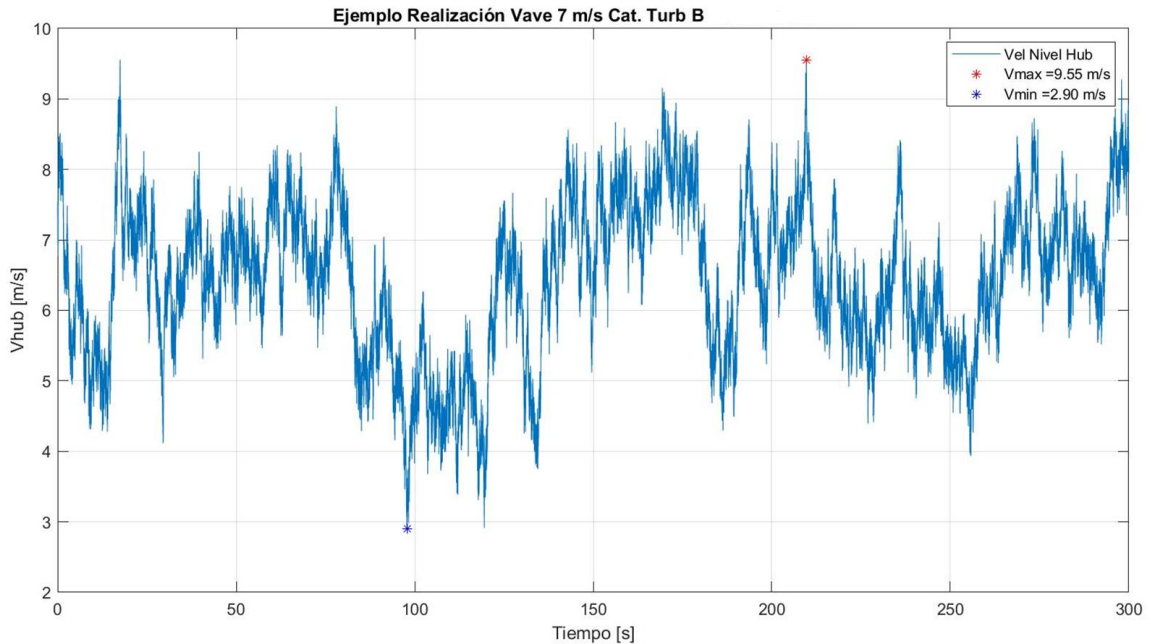
Las series de tiempo estocásticas se obtienen mediante la utilización del programa TurbSim [23] del NREL, en el cual además de ingresar los parámetros mencionados en los puntos anteriores, se introduce una semilla aleatoria, a partir de la cual se genera una serie de tiempo para el viento a nivel del eje del aerogenerador.

A manera de ejemplo, la Figura 10 muestra una serie de tiempo, obtenida a partir de los siguientes parámetros de entrada:



- Velocidad media: 7 m/s
- Característica de Turbulencia: B

Para el ejemplo particular, se obtiene una velocidad máxima de 9,55 m/s y una velocidad mínima de 2,90 m/s.



**Figura 10 Ejemplo Obtención Serie de Tiempo para Viento a Nivel de Eje mediante TurbSim**

### 3.6 Definición de Casos de Análisis

La siguiente tabla resume los casos de análisis para solicitaciones de viento a utilizar en este trabajo, los cuales serán posteriormente combinados con escenarios de sismo.

**Tabla 3 Casos de Análisis Solicitaciones de Viento**

Parámetro	Valor
Velocidad media	6-8-10-12-14-16-18 m/s
Característica de turbulencia	A-B-C
Semillas aleatorias	20 para cada par velocidad media /característica de turbulencia

Con lo anterior, se tiene un total de 7 velocidades medias, 3 turbulencias y 20 realizaciones, totalizando  $7 \times 3 \times 20 = 420$  series de tiempo para velocidades de viento a nivel de eje. La selección de

20 como número de realizaciones para iguales parámetros restantes corresponde a una estimación, que permita tener suficiente variabilidad de resultados y obtener por tanto tendencias.

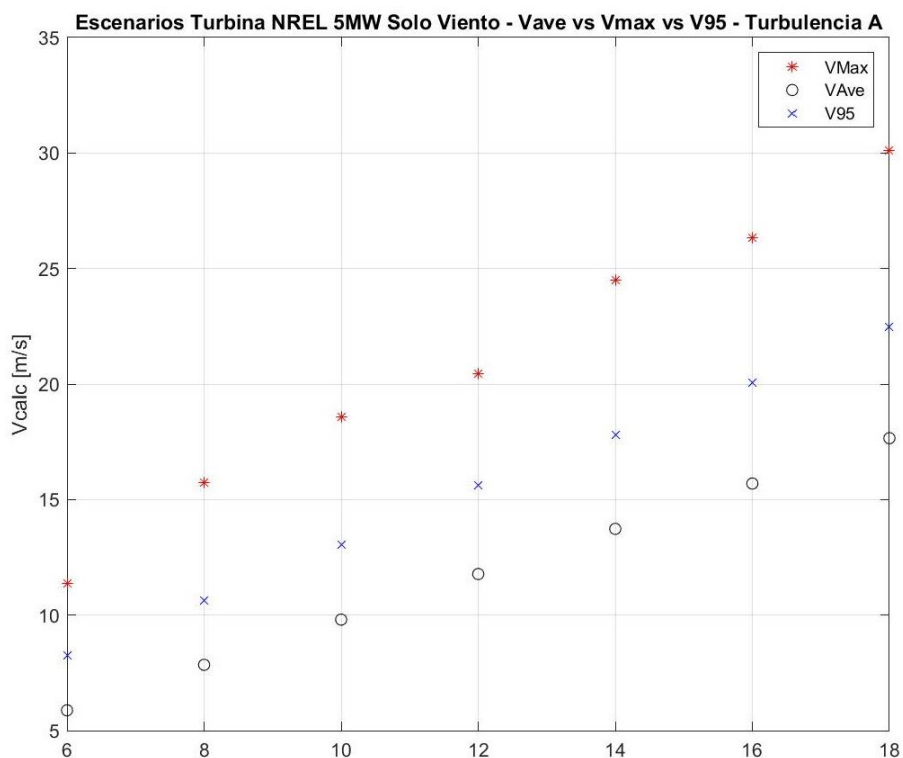
### 3.7 Análisis de Resultados

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos para los casos de análisis de viento por si solo, discutiendo respecto a los mismos en función de velocidad media, nivel de turbulencia y probabilidad de excedencia.

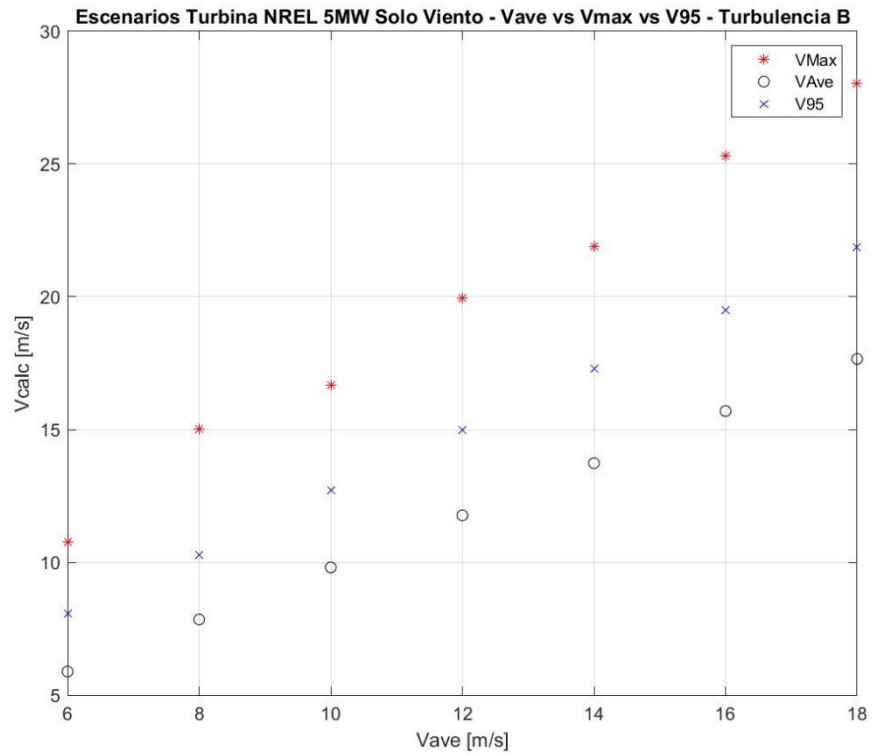
#### Realización de Velocidades

Las siguientes figuras dan cuenta de las velocidades máximas obtenidas para las series de tiempo generadas para las distintas realizaciones, en función de la velocidad media y niveles de turbulencia definidos como parámetros de entrada.

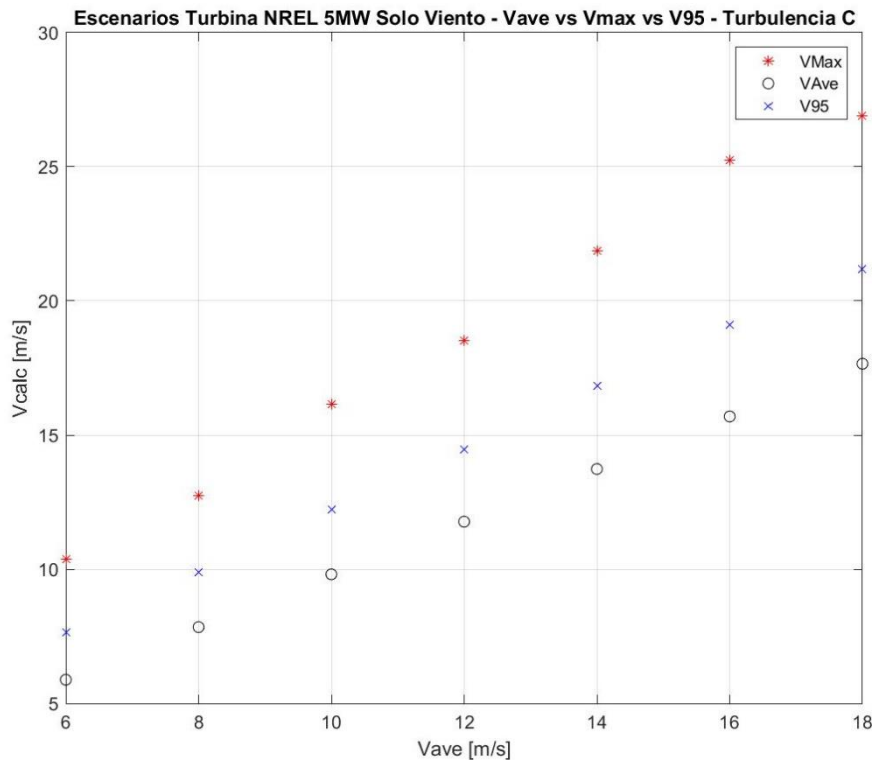
En cada figura (correspondiente a los niveles de turbulencia), se grafican los valores de velocidad media de entrada, velocidad máxima absoluta obtenida en la realización, y valor de velocidad asociado a una probabilidad de excedencia del 5%, es decir, la velocidad máxima que persiste el 95% del tiempo.



**Figura 11 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia A**



**Figura 12 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia B**



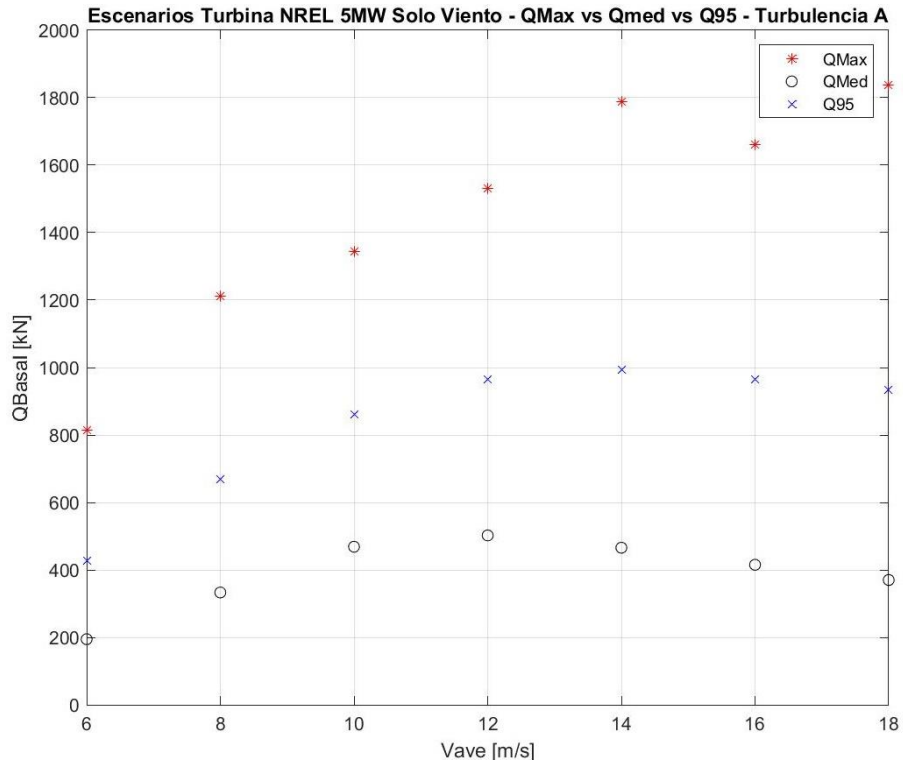
**Figura 13 Velocidad Media, 95% y Máxima para Realizaciones de Viento por Si Solo, para Nivel de Turbulencia C**

En función de los gráficos anteriores, es posible comentar:

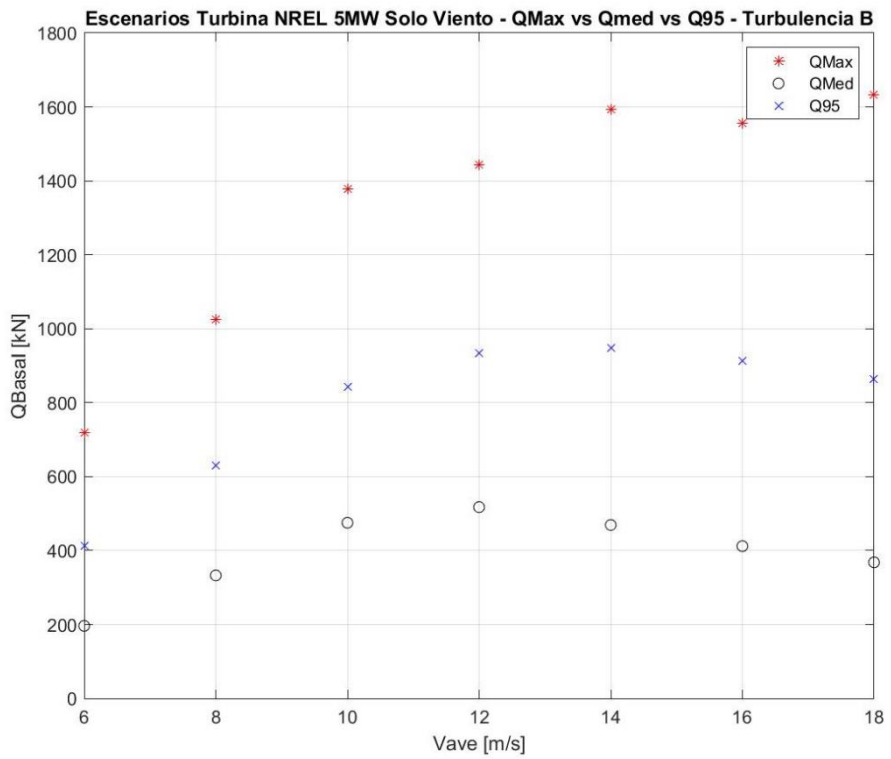
- Debe destacarse que los resultados presentados en las figuras precedentes corresponden únicamente al procesamiento de series de tiempo de viento a ser usadas como entrada en el análisis estructural, sin ser en sí mismas resultados.
- En todos los casos, la velocidad V95, correspondiente al valor máximo entre el 95% de los puntos de la serie de tiempo, ordenados, corresponde a valores de aproximadamente 1,25 veces la velocidad media definida como entrada. Este valor aumenta levemente en función del nivel de turbulencia (teniendo en cuenta que la Turbulencia A es la de mayor intensidad).
- De manera similar que en el caso anterior, el valor máximo de velocidad obtenida varía entre aproximadamente 1,6 y 1,9 veces el valor de la velocidad media de entrada, sin tener una variación fuerte en función del nivel de turbulencia establecido.
- La escasa variación de parámetros en función del nivel de turbulencia es consistente con lo establecido en la Ecuación 3.4-3, en la cual se puede observar que el valor  $I_{ref}$  toma valores de 0,12-0,14-0,16 para los distintos niveles de turbulencia, los que se consideran similares entre sí. En función de los resultados observados, se tiene que la variación de velocidad media como parámetro de entrada en una simulación es ampliamente más influyente que la variación del nivel de turbulencia considerado.

## **Corte Basal**

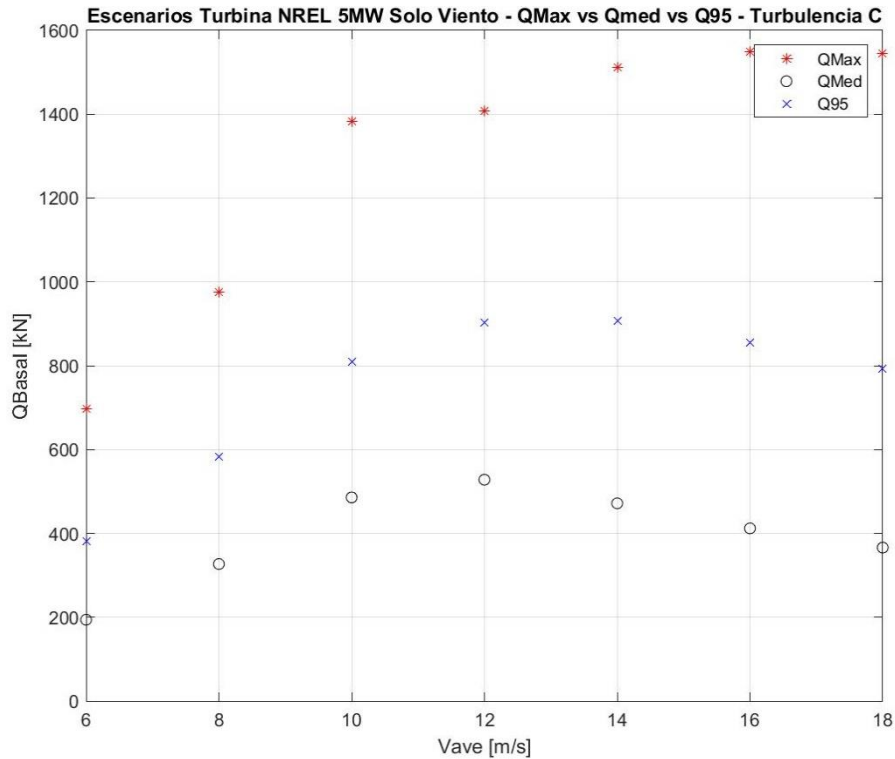
Las siguientes figuras dan cuenta de los resultados de corte basal obtenidos mediante FAST para la torre de referencia NREL de 90 metros, comparando -sólo para viento- la variación de resultados en función de las distintas velocidades medias y niveles de turbulencia de entrada. Por brevedad no se muestran acá los resultados obtenidos para las torres de 120 y 150 metros, teniéndose resultados similares para esos casos.



**Figura 14 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia A**



**Figura 15 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia B**



**Figura 16 Corte Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia C**

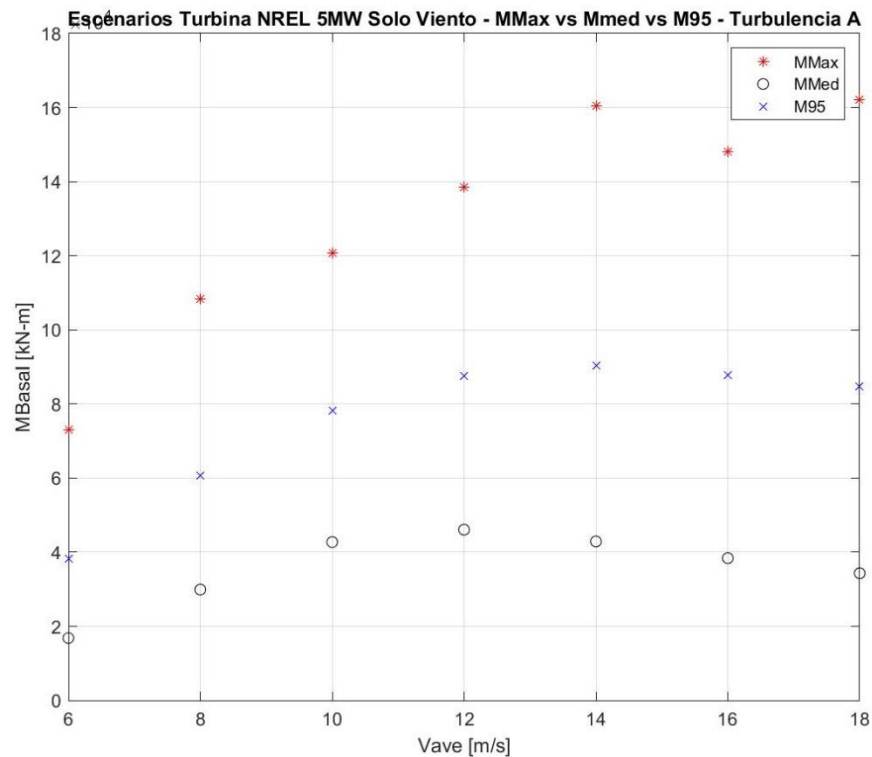
En función de los gráficos anteriores, es posible comentar:

- En todos los casos, se observa que el corte máximo obtenido comienza a disminuir a partir una velocidad media de entrada de aproximadamente 12 m/s. Debe destacarse que esto corresponde a una respuesta a la configuración del modelo de la turbina NREL en particular, que por motivos de optimización comienza a activar sus sistemas de freno poco pasado su velocidad de referencia (11,4 m/s). De no estar configurado de esta forma, el sistema seguiría aumentando el corte basal de manera proporcional a la velocidad de viento entrada.
- La relación de resultados del corte basal máximo, promedio y de 95% (máximo del 95% de los puntos ordenados de la serie de tiempo), son asimilables a lo obtenido para las series de tiempo de viento de entrada, constatándose que la variación de velocidad media es ampliamente más incidente que la variación del nivel de turbulencia.
- A manera informativa, el documento más utilizado en la práctica profesional, IEC61400 [10], considera como valor de diseño para las cargas de viento “el promedio del máximo entre 3 realizaciones”. Por lo tanto, en la práctica profesional, si se requiere combinar cargas definidas por el proveedor de equipos con cargas sísmicas obtenidas localmente, deberá considerarse que corresponden más bien a los valores máximos mostrados en los gráficos anteriores, teniendo en cuenta cuidadosamente la definición de velocidad que dicho diseñador consideró (como se explicó anteriormente, el análisis varía significativamente al considerar la velocidad media del sitio ( $V_{ave}$ ) o la velocidad de referencia de la máquina ( $V_r$ )).

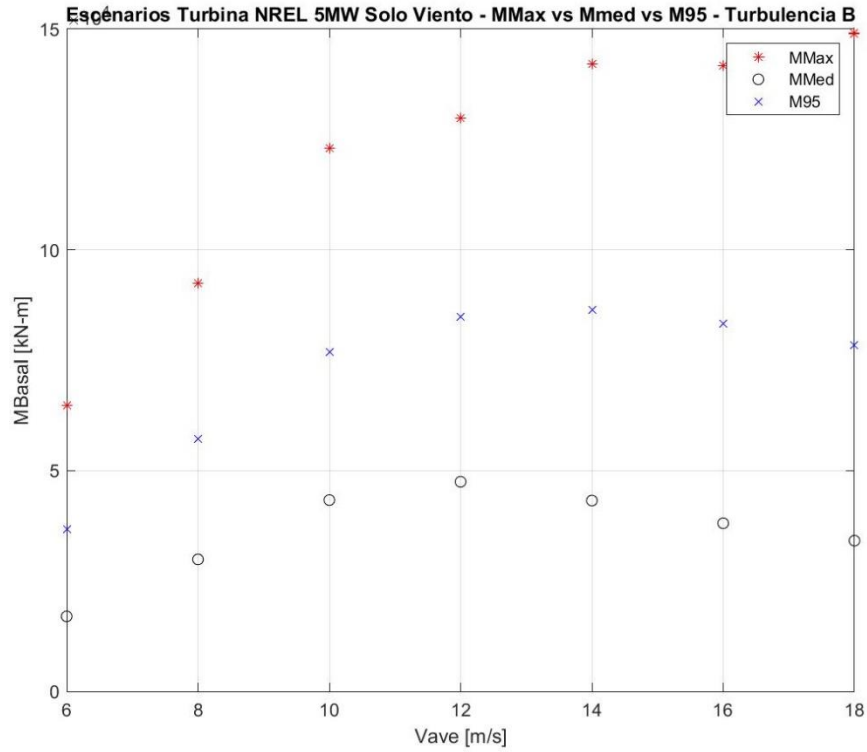
- En los gráficos anteriores se tiene un valor máximo de corte basal de 1.800 kN. Se estima para efectos comparativos un peso sísmico correspondiente al 100% del *nacelle* y rotor más 50% de la torre  $(111 + 240 + 519 \cdot 0,5) = 610 \text{ t} = 6.100 \text{ kN}$ . Por tanto, sólo para efectos de análisis y comparación referenciales, el corte máximo por viento obtenido podría asimilarse a  $1.800/6.100 = 30\%$ , lo que está en el rango de un corte sísmico elevado.

## Momento Basal

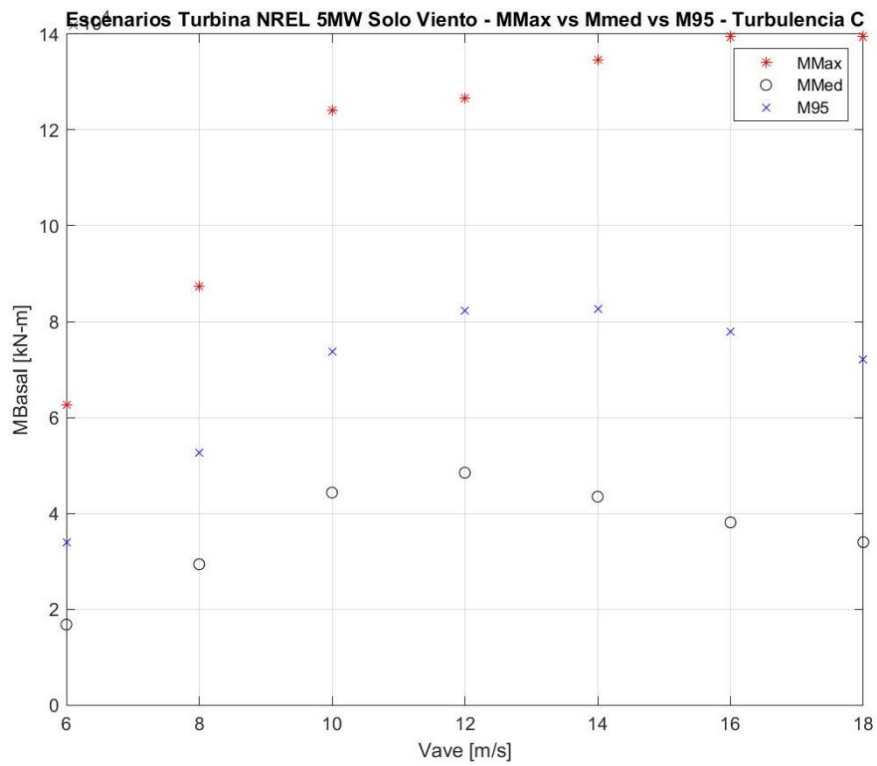
De manera similar al caso anterior, los siguientes gráficos presentan los resultados para el momento basal máximo obtenido, para los distintos casos de velocidad media de entrada e intensidad de turbulencia.



**Figura 17 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia A**



**Figura 18 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia B**



**Figura 19 Momento Basal Turbina NREL con Excitación Exclusiva de Viento, para Nivel de Turbulencia C**



En función de los gráficos anteriores, es posible comentar:

- Al igual que en el caso de los resultados de corte, se observa una disminución de los valores obtenidos a partir de los 12 m/s. Como se indicó, esto es función de la configuración del modelo de la turbina, esperándose que de no estar activados los mecanismos de limitación, los valores siguiesen subiendo de manera proporcional a la velocidad media del viento de entrada.
- La relación de resultados del momento basal máximo, promedio y de 95% (máximo del 95% de los puntos ordenados de la serie de tiempo), son asimilables a lo obtenido para las series de tiempo de viento de entrada, constatándose que la variación de velocidad media es ampliamente más incidente que la variación del nivel de turbulencia.

# Capítulo 4

## Respuesta a Solicitaciones Sísmicas

El presente capítulo define las sollicitaciones sísmicas a utilizar en este trabajo. Se considera series de tiempo correspondientes a distintos eventos representativos de eventos subductivos. En todos los casos, se utiliza una única dirección horizontal, la que posteriormente se combina con las sollicitaciones de viento.

Si bien tanto el sismo como el viento varían direcciones, se considera de manera conservadora que ambas acciones siempre ocurren en la misma dirección, pues si bien eventualmente la carga de viento perpendicular podría tener una magnitud mayor, en términos de suma vectorial siempre resulta peor la dirección coincidente.

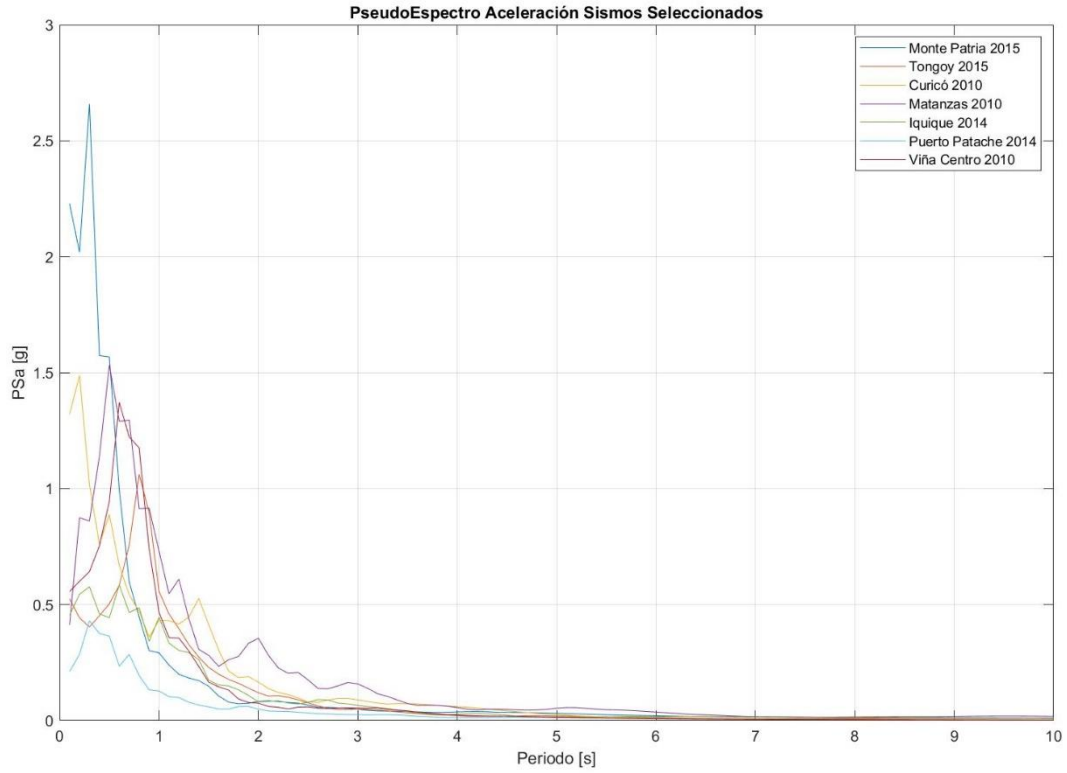
### 4.1 Registros Utilizados

La siguiente tabla muestra los registros seleccionados a partir de la base de datos procesada por Idini [24]. Se consideran 7 registros, representativos de distintos eventos, distancias epicentrales, tipos de suelo y contenidos de frecuencia.

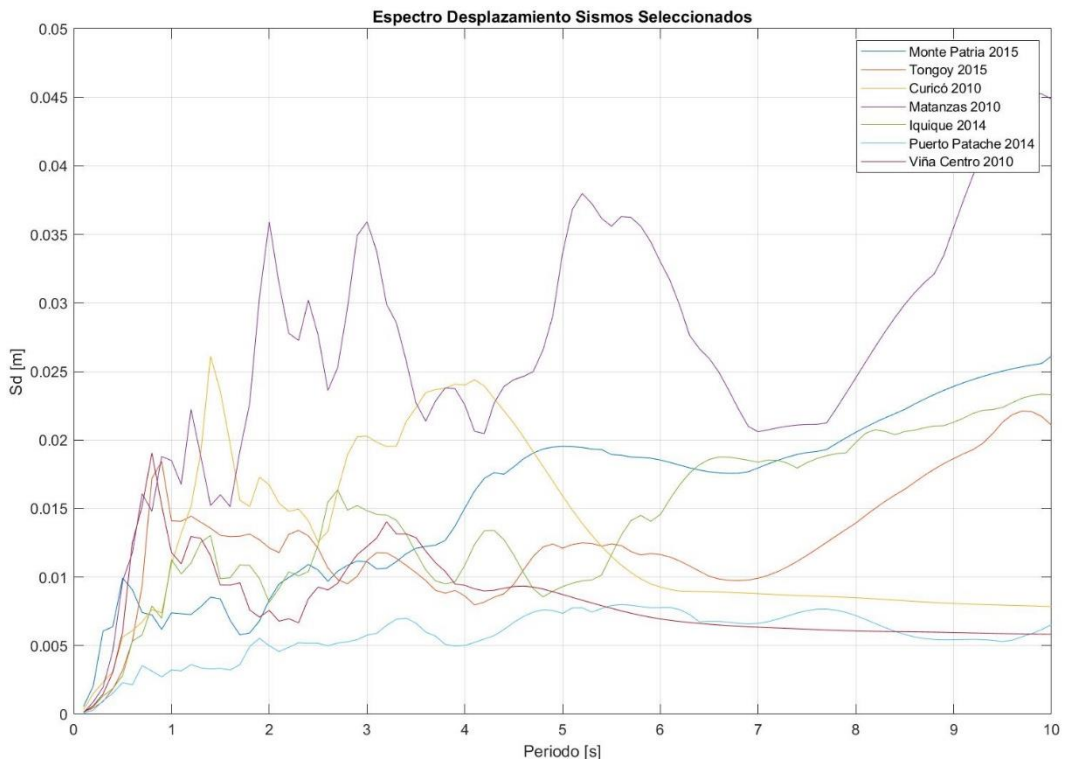
**Tabla 4 Selección de Registros Sísmicos para Análisis de Aerogeneradores**

<b>Estación</b>	<b>Tipo de Suelo NCh. 433</b>	<b>Evento</b>	<b>PGA (g)</b>
Curicó Hospital	B	Maule 2010 8,8 Mw	0,47
Matanzas	C	Maule 2010 8,8 Mw	0,35
Viña del Mar Centro	D	Maule 2010 8,8 Mw	0,33
Iquique Hospital	D	Iquique 2014 8,2 Mw	0,32
Puerto Patache	C	Iquique 2014 8,2 Mw	0,13
Tongoy	C	Illapel 2015 8,3 Mw	0,36
Monte Patria	C	Illapel 2015 8,3 Mw	0,83

Las siguientes figuras muestran el pseudoespectro de aceleraciones y espectro de desplazamiento para los registros seleccionados, considerando en todos los casos un amortiguamiento de 5%. Debe notarse que debido a la configuración de los aerogeneradores, resulta de interés el contenido de frecuencias en periodos altos.



**Figura 20 Pseudoespectro Aceleraciones Registros Seleccionados**



**Figura 21 Espectro Desplazamientos Registros Seleccionados**

## 4.2 Duración de Registros

Dado que el objetivo principal de este trabajo es la definición de una regla de combinación entre sollicitaciones sísmicas y de viento, se debe definir una ventana de tiempo en la cual considerar simultaneidad. Para este efecto, se determina la duración significativa (Trifunac [25]), como el tiempo transcurrido entre la ocurrencia del 5% y 95% de la energía del registro, calculada como:

$$D_{5-95} = \int_{0,05}^{0,95} a^2(t) dt \quad [\text{Ec. 4.2-1}]$$

Con esta definición, se tienen las siguientes duraciones significativas para los registros seleccionados:

**Tabla 5 Duración Significativa Registros Seleccionados**

Estación	Evento	Duración Significativa (s)
Curicó Hospital	Maule 2010 8,8 Mw	50,2
Matanzas	Maule 2010 8,8 Mw	34,0
Viña del Mar Centro	Maule 2010 8,8 Mw	24,6
Iquique Hospital	Iquique 2014 8,2 Mw	34,3
Puerto Patache	Iquique 2014 8,2 Mw	35,0
Tongoy	Illapel 2015 8,3 Mw	49,1
Monte Patria	Illapel 2015 8,3 Mw	36,6

## 4.3 Amortiguamiento Estructural

En el caso de los aerogeneradores, el principal aspecto que contribuye al amortiguamiento es la operación del equipo, asociada a la disipación por efecto hidrodinámico por el movimiento de las aspas en el aire. Por este motivo, se debe considerar un amortiguamiento distinto cuando el equipo está o no en operación, definiéndose estos valores en la literatura consultada, particularmente IEC61400 [3], como:

- Aerogenerador detenido: 1%
- Aerogenerador en operación: 5%

Debe notarse que los valores de amortiguamiento reflejan directamente lo mencionado en la literatura consultada, sin haberse encontrado referencias de mediciones de amortiguamiento en sistemas reales, que podrían resultar en valores intermedios entre 1% y 5%, y por tanto, modificar significativamente los resultados.

## 4.4 Escalamiento y Casos de Análisis

Con el objetivo de cubrir un rango amplio de aceleraciones, se considera el escalamiento del PGA de los registros antes descritos para 4 niveles de aceleración, teniéndose en cada caso amortiguamientos de 1% y 5% que den cuenta del aerogenerador detenido o en operación, respectivamente. Con esto, se tienen los siguientes casos de análisis sísmico:

**Tabla 6 Casos de Análisis Solicitaciones Sísmicas**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Registro	Curicó Hospital 2010
	Matanzas 2010
	Viña del Mar Centro 2010
	Iquique Hospital 2014
	Puerto Patache 2014
	Tongoy 2015
	Monte Patria 2015
Escalamiento PGA	0,4-0,6-0,8-1,0 g
Amortiguamiento	1% (detenido), 5% (operación)

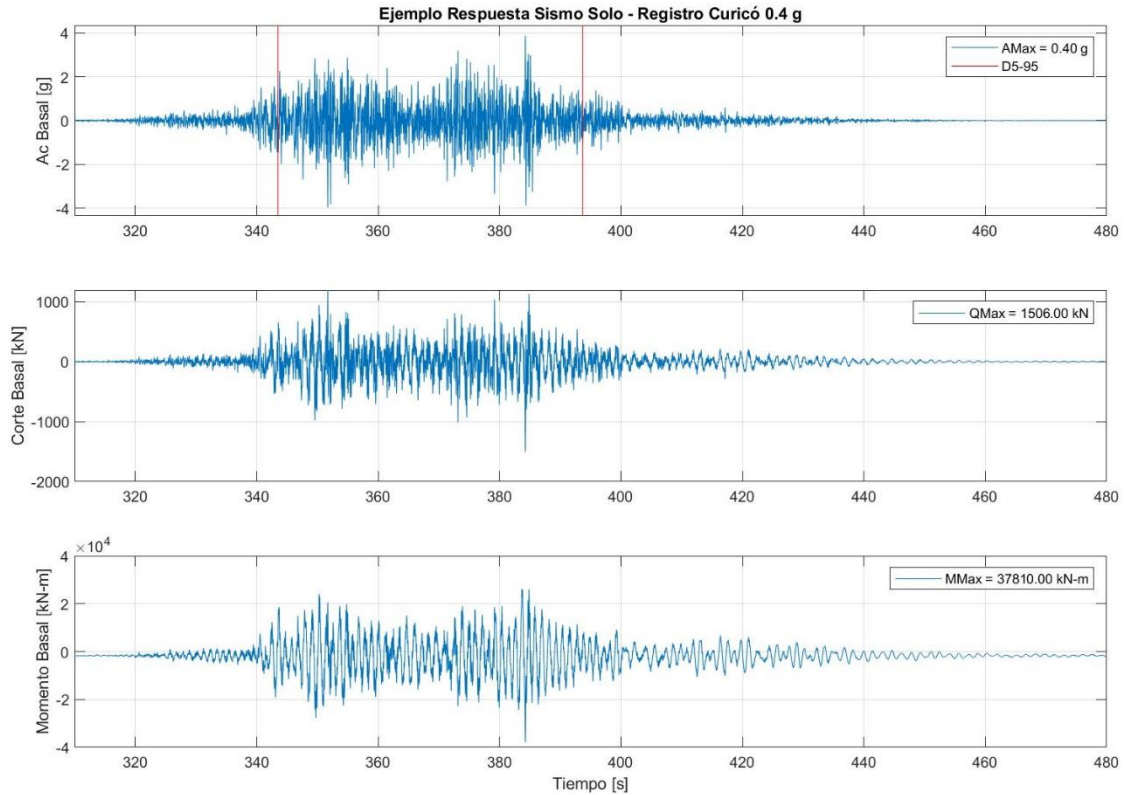
Con lo anterior, se tiene un total de 7 registros, 4 factores de escala y 2 amortiguamientos, totalizando 56 casos de análisis sísmico.

## 4.5 Resultados

A continuación se presentan y discuten resultados del análisis desarrollado para casos de sismo por sí sólo, en términos de respuesta general en corte y momento basal, variación de resultados en función de PGA y variación de resultados comparando valores máximos, medios y asociados a un nivel de confianza de 95%.

### Ejemplo Series de Tiempo

La siguiente figura muestra, a manera de ejemplo, los resultados obtenidos para el registro de Curicó escalado a un PGA de 0,4 g, para corte y momento basal.



**Figura 22 Ejemplo Series de Tiempo Resultados Corte y Momento Basal – Registro Curicó Escalado a 0,4 g (Torre 90 m)**

El ejemplo anterior es representativo de cada uno de los casos definidos en la Tabla 6, donde se calculó la duración significativa para el registro, así como también la respuesta en corte y momento basal.

## Comparación de Valores Máximos y Niveles de Confianza en Función de PGA

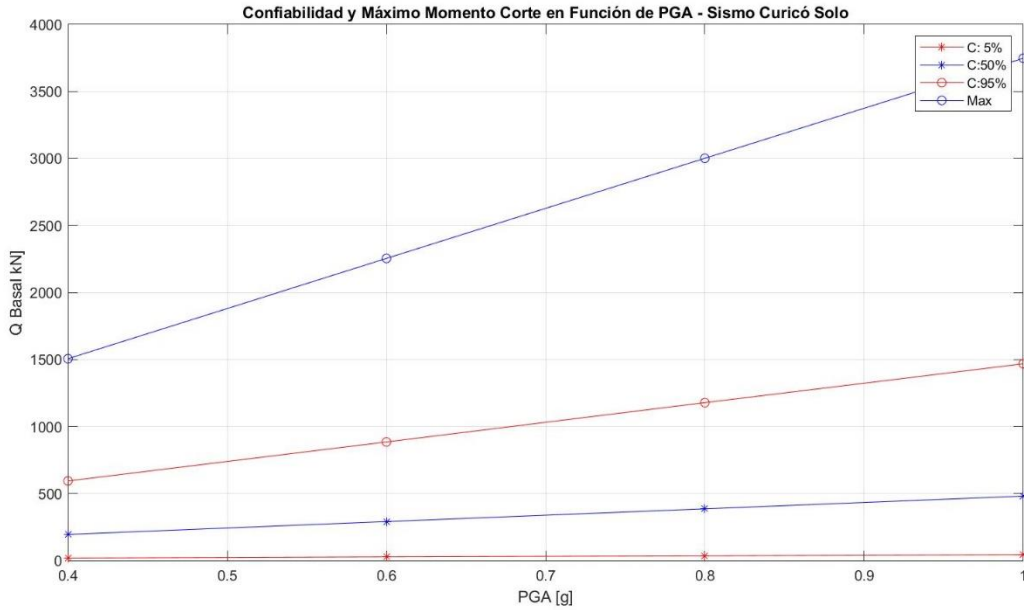
Tomando como ejemplo el registro de Curicó antes mencionado, se analizan las series de tiempo de respuesta obtenidas para distintos niveles de aceleración, conforme al siguiente procedimiento:

- Se toma valor absoluto para la serie de tiempo de corte o momento.
- Se ordena la serie obtenida de menor a mayor.
- Se considera como valor asociado a una confiabilidad de 5% al valor ordenado, correspondiente al índice equivalente al 5% del total de puntos.
- Se considera como valor asociado a una confiabilidad del 50% al valor ordenado, correspondiente al índice equivalente al 50% del total de puntos.
- Se considera como valor asociado a una confiabilidad del 95% al valor ordenado,

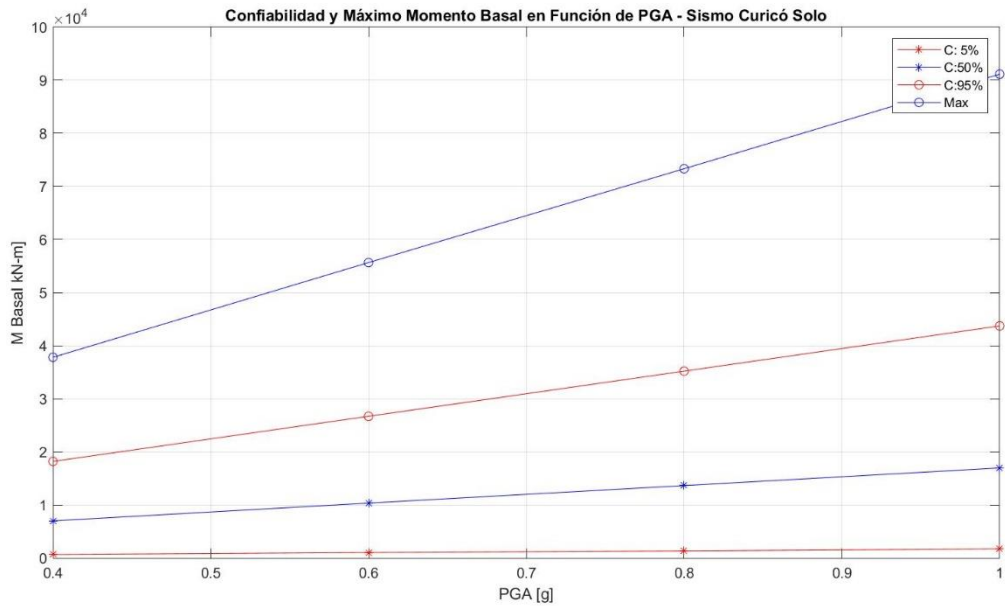
correspondiente al índice equivalente al 95% del total de puntos.

- Se considera además el valor máximo, correspondiente al último valor de la serie ordenada (o máximo de la completa), no aplicando en este caso el concepto de confiabilidad del 100%.

A partir de lo anterior, se obtienen los siguientes gráficos:



**Figura 23 Valores Máximos y Asociados a Confiabilidad – Corte Basal Registro Curicó para Distintos PGA (Torre 90 m)**



**Figura 24 Valores Máximos y Asociados a Confiabilidad – Momento Basal Registro Curicó para Distintos PGA (Torre 90 m)**

De los gráficos anteriores, es posible observar:

- En todos los casos, la respuesta analizada, sea máxima o asociada a un determinado nivel de confiabilidad, es linealmente proporcional al PGA del registro.
- El valor máximo, tanto para corte como para momento, resulta en todos los casos aproximadamente el doble del valor asociado a una confiabilidad de 95%. Esto implica que considerar únicamente los valores peak de respuesta podría implicar un sobredimensionamiento al momento de considerar cargas de diseño, aunque la relación peak-valor 95% podría verse afectada, por ejemplo, por el filtrado de señales.



# Capítulo 5

## Respuesta Combinada

El presente capítulo describe la metodología utilizada en el análisis de escenarios y procesamiento de resultados.

### 5.1 Escenarios de Análisis (Realizaciones)

En primera instancia, se llevan a cabo los análisis tiempo historia mediante la plataforma FAST, considerando en todos los casos un tiempo de análisis de 10 minutos, para solicitaciones de viento y sismo por si solas, además de su efecto integrado. Los resultados de cada uno de estos análisis se denomina realizaciones, efectuándose para los siguientes escenarios:

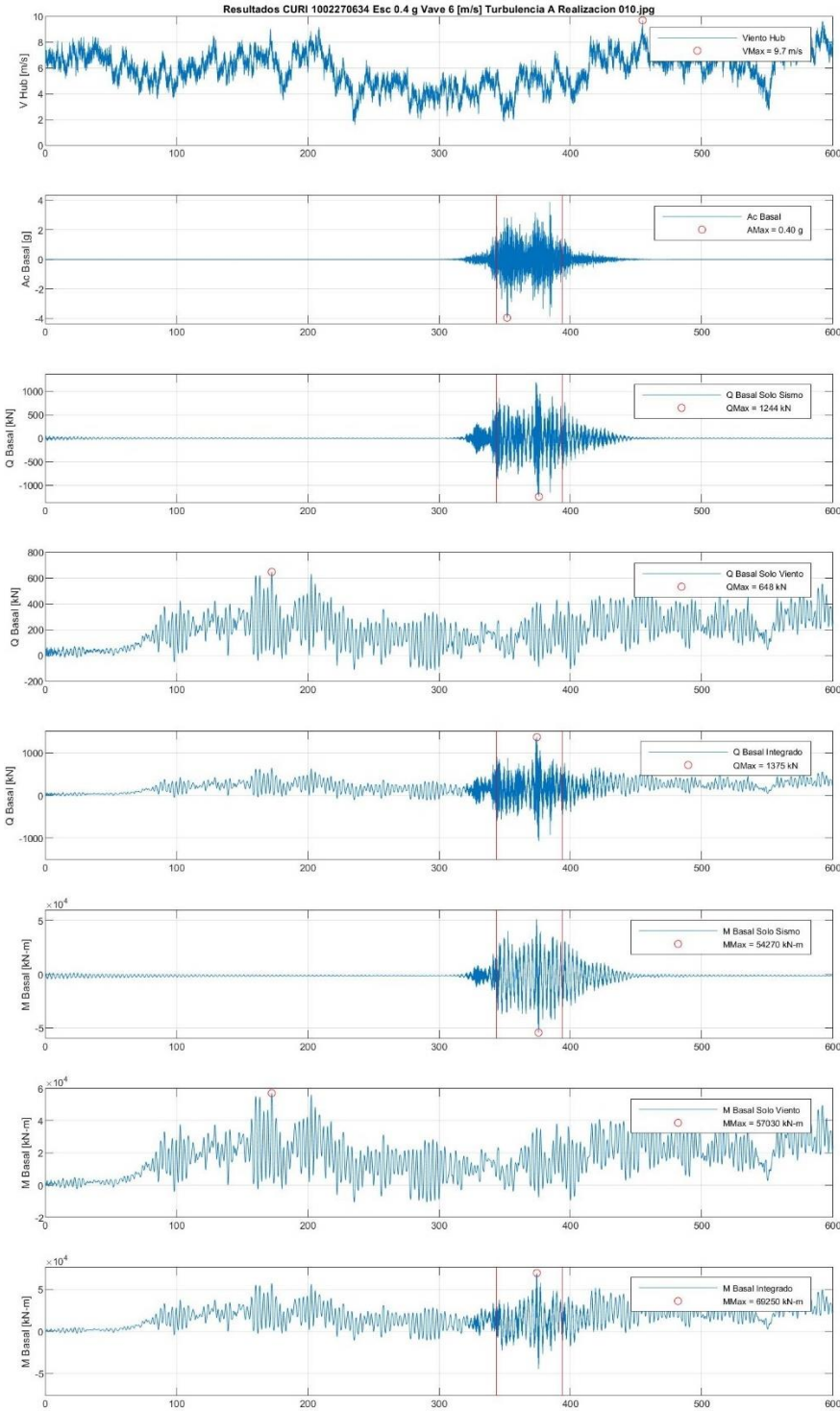
**Tabla 7 Definición Realizaciones para Cada Aerogenerador**

Escenario	Registro Sísmico	Escala PGA	V Media Viento	Nivel Turbulencia	Realizaciones por Caso	Realizaciones por Escenario
Sólo Viento	-	-	7 casos (6 a 18 m/s)	3 casos (A-B-C)	20	420
Sólo Sismo	7 registros	4 casos (0,4 a 1 g)	-	-	-	28
Integrado	7 registros	4 casos (0,4 a 1 g)	7 casos (6 a 18 m/s)	3 casos (A-B-C)	20	11.760
<b>Total Realizaciones</b>						<b>12.208</b>

Con lo anterior, se tiene un total de 12.208 realizaciones, las que al considerar los 3 tipos de conjunto aerogenerador-torre evaluados totalizan 36.624 análisis. Cada corrida toma un tiempo de aproximadamente 150 segundos (variable según los distintos computadores utilizados), completando del orden de 1.500 horas máquina.

Si bien la plataforma FAST es capaz de entregar numerosos parámetros de salida, como velocidad angular del aerogenerador, esfuerzos y desplazamientos a lo largo de torre y aspas, y parámetros mecánicos, se decidió acotar los resultados a analizar únicamente a corte y momento basal, toda vez que son los más significativos para efectos del diseño de torres y fundaciones.

La Figura 25 a continuación ejemplifica gráficamente los resultados obtenidos para una de las realizaciones descritas. En los casos sísmicos, se agregan líneas verticales correspondientes a los tiempos que delimitan el 5% y 95% de la energía (D595 según la ecuación 4.2-1).



**Velocidad Viento**

**Aceleración Basal**

**Corte Basal Solo Sismo**

**Corte Basal Solo Viento**

**Corte Basal Integrado**

**Momento Basal Solo Sismo**

**Momento Basal Solo Viento**

**Momento Basal Integrado**

**Figura 25 Ejemplo Resultado Realizaciones FAST – Solo Sismo, Solo Viento y Análisis Integrado**

## 5.2 Consideraciones para Análisis Numérico

En complemento a los aspectos previamente descritos, el análisis incluye las siguientes consideraciones:

- Se utiliza una frecuencia de muestreo para análisis de 500 muestras por segundo, lo cual es un valor recomendado según la literatura estudiada [20]. Este valor es independiente de los pasos intermedios del programa para resolución de no linealidades (es decir, el software utilizado puede subdividir pasos localmente para resolver ecuaciones), y también es independiente de la frecuencia de muestreo de los registros sísmicos utilizados en análisis integrados.
- Las señales de aceleración correspondientes a registros sísmicos se deben procesar eliminando contenido de muy baja frecuencia, teniendo en cuenta que dada la naturaleza de los sistemas estudiados, este filtro no puede ocultar información relevante en el rango de periodos de 3 a 7 segundos. Para tal efecto, se procesó los registros utilizando un filtro Butterworth de doble pasada, dejando la banda entre 0,04 y 20 segundos (frecuencia entre 0.05 y 25 hz), de manera de eliminar contenido de frecuencia muy bajo que puede generar desviaciones en integración, y contenido muy alto asociado a ruido. Se estima, por tanto, que el contenido de periodos remanente (hasta 20 segundos) es suficiente para incluir el comportamiento de estructuras de periodos naturales elevados, como es el caso de los aerogeneradores.
- Se consideran en todo caso realizaciones de 600 segundos de duración, lo cual es consistente con los requisitos de análisis para series de viento del IEC61400 [3]. Para efectos de estabilidad numérica de la plataforma FAST, los registros sísmicos, independiente de su duración, se hacen iniciar en 300 segundos. Esto responde a una recomendación del proveedor de la plataforma, habiéndose comprobado en este trabajo que si se hace partir el sismo muy pronto con respecto al inicio del registro global, pueden producirse inestabilidades numéricas.

## 5.3 Procesamiento de Resultados

Las series de tiempo obtenidas para corte y momento basal para las distintas realizaciones se concatenan, con el objetivo de obtener valores asociados a distintos niveles de confianza, asociados a distintas velocidades medias, PGA y niveles de turbulencia, conforme a los siguientes criterios:

- Las series de tiempo correspondientes a casos de viento puro se concatenan para distintas velocidades y niveles de turbulencia, quedando un único vector que incluye todas las realizaciones correspondientes a las 20 realizaciones asociadas a dichos valores.
- En el caso de series de tiempo asociadas a sismo puro, se extrae únicamente la parte de las series de tiempo correspondientes al intervalo D595, concatenando los resultados de los 7 registros analizados, obteniéndose 4 vectores correspondientes a los 4 niveles de PGA analizados.
- En el caso de series de tiempo para análisis integrados, también se extrae únicamente los vectores correspondientes al intervalo D595, concatenándose los resultados de 7 registros y 20 realizaciones, con lo que se logra un vector resumido para cada conjunto velocidad media-nivel

de turbulencia-PGA.

Una vez concatenadas las series de tiempo conforme a los criterios antes descritos, se obtienen los valores asociados a distintos niveles de confianza, ordenando los valores absolutos y eligiendo los valores máximos asociados a los siguientes porcentajes:

- Nivel 50%.
- Nivel 95%.
- Nivel 99%.
- Nivel 100% (en rigor, esto considera el 100% de los valores estudiados, no correspondiente a una confiabilidad de 100%).

Lo anterior implica que para -por ejemplo- una serie de 1.000 valores, el nivel 50% corresponde al elemento 500 de la serie llevada a valor absoluto y ordenada de menor a mayor, el nivel 95% corresponde al elemento 950, el nivel 99% corresponde al elemento 990 y el nivel 100% corresponde al elemento 1.000, es decir, el máximo valor absoluto. La definición de estos niveles permite incluir resultados con distintos niveles de confiabilidad, permitiendo considerar valores estadísticamente significativos, a diferencia de considerar sólo el valor máximo de una determinada serie, el que podría estar asociado a peaks correspondiente a motivos numéricos. A nivel probabilístico, estos valores se pueden entender como probabilidades de excedencia, por ejemplo el nivel 95% correspondería al 5% de probabilidad de excedencia, con la excepción del nivel 100% que solamente corresponde al valor máximo y no está asociado a ninguna métrica estadística.

## 5.4 Obtención de Indicadores

Dado que el objetivo de esta tesis es proponer reglas de combinación de cargas calculadas independientemente frente a los valores provenientes de un análisis integrado, se definen los siguientes indicadores, asociados a las distintas reglas de combinación estudiadas:

- *R100*: combinación de 100% del valor máximo correspondiente a sismo con 100% del valor máximo para viento.
- *R75*: combinación de 75% de máximos de viento y sismo.
- *RSRSS*: combinación de raíz de suma de cuadrados para resultados de sismo y viento.

$$R100 = \frac{W+E}{I} \quad [\text{Ec. 5.4-1}]$$

$$R75 = \frac{0.75 \cdot W + 0.75 \cdot E}{I} \quad [\text{Ec. 5.4-2}]$$

$$RSRSS = \frac{\sqrt{W^2 + E^2}}{I} \quad [\text{Ec. 5.4-3}]$$

Donde *W* es el resultado para corte o momento basal asociado a viento puro, *E* corresponde a

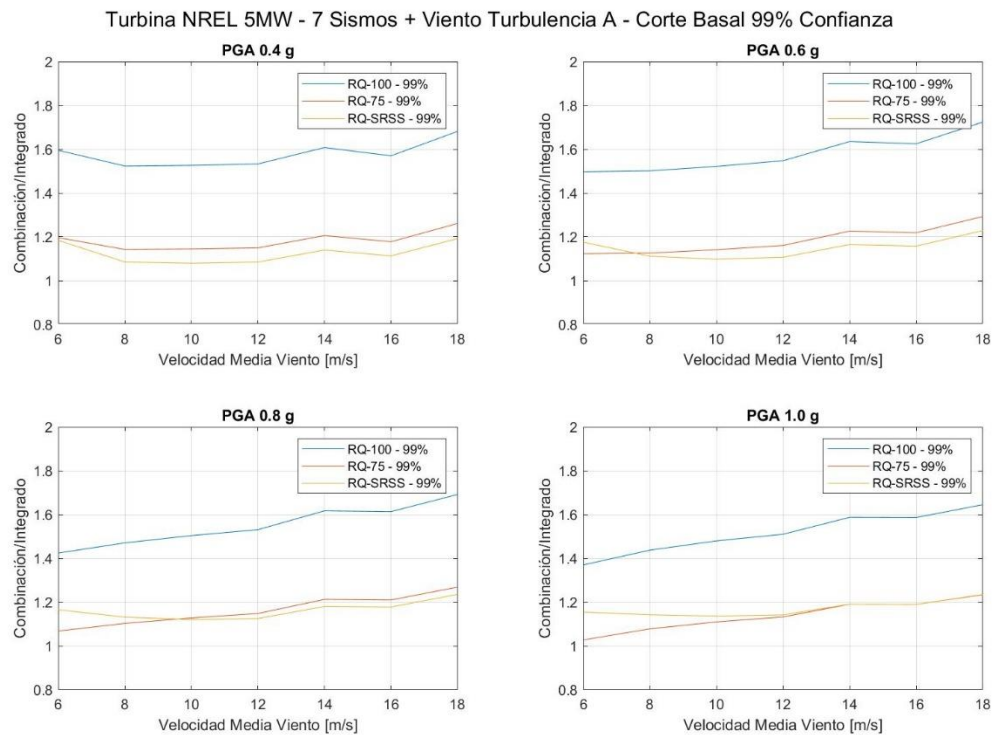
sismo puro e  $I$  representa al resultado del análisis integrado. De esta manera, un resultado igual o mayor a 1 indica que la regla de combinación utilizada entrega valores mayores o iguales que el análisis integrado.

Con lo anterior, se evalúan los indicadores  $R_{100}$ ,  $R_{75}$  y  $RSRSS$  para corte y momento basal, para los siguientes casos:

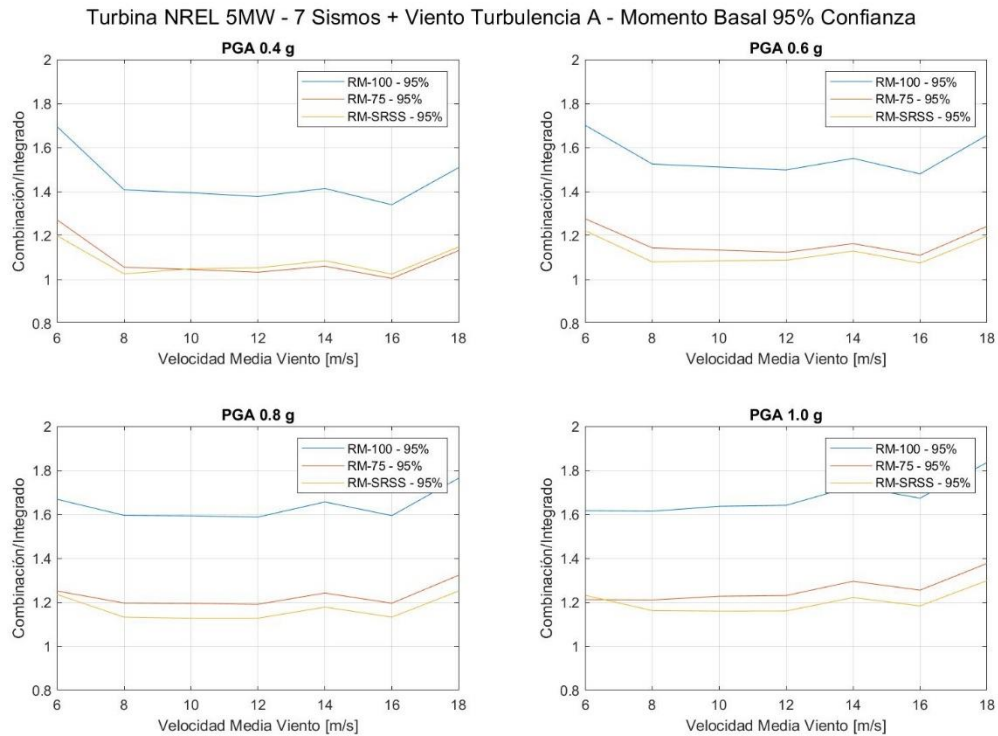
- Distintos niveles de turbulencia.
- Distintas velocidades medias de viento (agrupando los distintos casos de semillas aleatorias).
- Distintos niveles de PGA (agrupando los distintos registros sísmicos).

De esta manera, se construyen curvas para los indicadores  $R$  asociadas a los casos anteriores, para las 3 torres analizadas, desde las cuales se concluirá respecto a la validez de las reglas de combinación propuestas, para los distintos niveles de confianza previamente establecidos (50%, 95%, 99% y 100%).

A manera de ejemplo, los siguientes gráficos muestran resultados para los valores  $R$  obtenidos en función de distintas velocidades medias de viento, PGA y niveles de turbulencia. Se tiene en cada gráfico curvas para las reglas de combinación  $R_{100}$ ,  $R_{75}$  y  $RSRSS$ , donde el eje horizontal corresponde a distintas velocidades medias de viento y el eje vertical corresponde al valor  $R$  obtenido, mientras que cada uno de los 4 gráficos corresponde a un PGA.



**Figura 26 Ejemplo Resultados Valores  $R$  – Corte Basal con 99% de Confianza para Nivel de Turbulencia A, Turbina NREL 5MW**



**Figura 27 Ejemplo Resultados Valores R – Momento Basal con 95% de Confianza para Nivel de Turbulencia A, Turbina NREL 5MW**

## 5.5 Resultados

A continuación se resumen los resultados obtenidos para los indicadores de análisis y niveles de confiabilidad definidos en el párrafo 5.4 para los 3 tipos de aerogenerador y torre analizados. El detalle de los resultados numéricos y gráficos se entrega en los Anexos 3 a 8 de este documento.

### Resultados Torre 90 m

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos para la torre de 90 m, reflejando los indicadores R100, R75 y RSRSS obtenidos tanto para momento como para corte, así como también para los distintos niveles de confianza considerados (50%, 95%, 99% y 100%).

El valor medio R100, R75 y RSSS corresponde, para cada nivel de confianza estudiado, al promedio de los valores obtenidos para los 4 niveles de PGA y 7 niveles de velocidad de viento, mientras que la desviación estándar también responde al promedio de los 4 niveles de PGA y 7 niveles de velocidad de viento. De esta manera, cada una de las tablas presentadas a continuación resume, a su vez, 28 combinaciones de PGA y velocidad de viento.

Con el objetivo de simplificar la presentación de resultados, las Tablas 8, 9 y 10 muestran el resultado detallado para los casos de combinación R100 para la Torre de 90 m, presentando luego de ello el resumen en la Tabla 11. De esta manera, para los resultados siguientes, sólo se entrega la tabla resumen correspondiente.

**Tabla 8 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia A**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>18 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,55	1,24	1,28	1,24	1,32	1,28	1,41
PGA 0,6 g	1,56	1,36	1,41	1,36	1,43	1,39	1,51
PGA 0,8 g	1,53	1,43	1,50	1,45	1,50	1,46	1,57
PGA 1,0 g	1,50	1,47	1,55	1,51	1,55	1,51	1,60
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,57	1,47	1,46	1,46	1,52	1,45	1,60
PGA 0,6 g	1,48	1,49	1,51	1,52	1,60	1,55	1,67
PGA 0,8 g	1,41	1,47	1,51	1,54	1,62	1,59	1,67
PGA 1,0 g	1,35	1,43	1,49	1,53	1,61	1,58	1,65
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,60	1,52	1,53	1,53	1,61	1,57	1,68
PGA 0,6 g	1,50	1,50	1,52	1,55	1,64	1,63	1,72
PGA 0,8 g	1,42	1,47	1,50	1,53	1,62	1,61	1,69
PGA 1,0 g	1,37	1,44	1,48	1,51	1,59	1,59	1,64
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,54	1,42	1,41	1,47	1,44	1,41	1,60
PGA 0,6 g	1,40	1,41	1,40	1,47	1,43	1,41	1,60
PGA 0,8 g	1,32	1,39	1,39	1,45	1,42	1,41	1,57
PGA 1,0 g	1,27	1,38	1,38	1,43	1,41	1,40	1,49

**Tabla 9 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia B**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>18 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,43	1,29	1,28	1,26	1,33	1,33	1,40
PGA 0,6 g	1,49	1,42	1,40	1,39	1,45	1,45	1,51
PGA 0,8 g	1,50	1,49	1,49	1,48	1,53	1,52	1,57
PGA 1,0 g	1,48	1,53	1,55	1,54	1,58	1,56	1,60
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,51	1,47	1,45	1,46	1,48	1,55	1,56
PGA 0,6 g	1,44	1,48	1,50	1,51	1,56	1,62	1,63
PGA 0,8 g	1,38	1,45	1,51	1,53	1,59	1,63	1,64
PGA 1,0 g	1,34	1,42	1,49	1,52	1,58	1,61	1,61
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,51	1,52	1,52	1,57	1,66	1,65
PGA 0,6 g	1,45	1,48	1,52	1,53	1,60	1,68	1,67
PGA 0,8 g	1,39	1,45	1,49	1,52	1,59	1,65	1,63
PGA 1,0 g	1,35	1,42	1,47	1,50	1,56	1,61	1,60
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,40	1,39	1,38	1,53	1,38	1,52	1,53
PGA 0,6 g	1,39	1,39	1,39	1,50	1,40	1,52	1,50
PGA 0,8 g	1,32	1,38	1,39	1,48	1,41	1,50	1,49
PGA 1,0 g	1,27	1,35	1,39	1,46	1,40	1,48	1,47

**Tabla 10 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa) – Nivel de Turbulencia C**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>18m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,42	1,29	1,26	1,33	1,36	1,39
PGA 0,6 g	1,57	1,53	1,42	1,38	1,45	1,48	1,51
PGA 0,8 g	1,55	1,58	1,51	1,48	1,53	1,56	1,57
PGA 1,0 g	1,52	1,60	1,57	1,55	1,59	1,60	1,60
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,50	1,50	1,44	1,45	1,51	1,55	1,56
PGA 0,6 g	1,43	1,49	1,48	1,51	1,58	1,61	1,63
PGA 0,8 g	1,37	1,45	1,48	1,52	1,60	1,62	1,62
PGA 1,0 g	1,32	1,41	1,46	1,51	1,58	1,60	1,60
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,50	1,52	1,50	1,51	1,60	1,65	1,67
PGA 0,6 g	1,44	1,49	1,49	1,51	1,60	1,65	1,68
PGA 0,8 g	1,38	1,45	1,47	1,50	1,58	1,62	1,64
PGA 1,0 g	1,33	1,41	1,45	1,48	1,55	1,59	1,60
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,45	1,46	1,49	1,41	1,49	1,42	1,60
PGA 0,6 g	1,40	1,44	1,47	1,41	1,46	1,41	1,58
PGA 0,8 g	1,32	1,42	1,45	1,40	1,44	1,40	1,57
PGA 1,0 g	1,26	1,36	1,43	1,39	1,43	1,39	1,54

**Tabla 11 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa) (Resumen Tablas 8-9-10)**

<b>Nivel Confianza</b>	<b>R100 Turbulencia A</b>		<b>R100 Turbulencia B</b>		<b>R100 Turbulencia C</b>	
	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>
50%	1,45	0,10	1,46	0,09	1,49	0,10
95%	1,53	0,08	1,52	0,08	1,51	0,08
99%	1,56	0,08	1,54	0,09	1,53	0,09
100%	1,43	0,07	1,43	0,07	1,44	0,07

**Tabla 12 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

<b>Nivel Confianza</b>	<b>R75 Turbulencia A</b>		<b>R75 Turbulencia B</b>		<b>R75 Turbulencia C</b>	
	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Media</b>	<b><math>\sigma</math></b>
50%	1,08	0,08	1,09	0,07	1,12	0,07
95%	1,15	0,06	1,14	0,06	1,14	0,06
99%	1,17	0,06	1,15	0,06	1,15	0,07
100%	1,08	0,06	1,07	0,05	1,08	0,05



**Tabla 13 Resultados Torre 90 m – Corte Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )**

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,05	0,05	1,07	0,04	1,09	0,04
95%	1,11	0,05	1,11	0,04	1,11	0,04
99%	1,15	0,04	1,15	0,04	1,15	0,04
100%	1,08	0,05	1,09	0,05	1,10	0,05

**Tabla 14 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa)**

Nivel Confianza	R100 Turbulencia A		R100 Turbulencia B		R100 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,35	0,15	1,35	0,13	1,38	0,14
95%	1,58	0,12	1,58	0,11	1,60	0,11
99%	1,71	0,12	1,71	0,12	1,72	0,12
100%	1,55	0,09	1,50	0,09	1,53	0,07

**Tabla 15 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

Nivel Confianza	R75 Turbulencia A		R75 Turbulencia B		R75 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,01	0,11	1,01	0,09	1,04	0,11
95%	1,19	0,09	1,19	0,08	1,20	0,08
99%	1,28	0,09	1,28	0,09	1,29	0,09
100%	1,16	0,07	1,12	0,07	1,15	0,05

**Tabla 16 Resultados Torre 90 m – Momento Basal Combinación RSRSS  
( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )**

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,03	0,07	1,03	0,05	1,06	0,05
95%	1,14	0,07	1,14	0,06	1,15	0,06
99%	1,23	0,08	1,23	0,08	1,25	0,08
100%	1,12	0,07	1,08	0,05	1,11	0,05

A partir de los resultados mostrados, se puede concluir para la Torre de 90 m:

- En el total de los casos estudiados tanto para corte como para momento, el indicador R100 resultó conservador, considerándose como tal que su valor medio menos una desviación estándar es mayor a 1, es decir, sumar máximos de resultados individuales

resulta siempre más conservador que analizar el valor del resultado integrado. Se observa la variación que este indicador no es significativamente dependiente del PGA de los registros sísmicos, de la velocidad media del viento o del nivel de turbulencia del viento.

- El indicador R75, al igual que el caso anterior, no presenta variaciones significativas en función de PGA, velocidad media del viento o nivel de turbulencia. Se observa que en el total de los casos de corte el valor medio menos una desviación estándar es mayor a 1, por lo que se considera conservador. Sin embargo, en el caso de momento, se tienen dos pares (entre 12) media – desviación en la Tabla 15 donde no se cumple el criterio descrito.
- En el caso del indicador RSRSS, se tienen resultados similares en términos de poca variabilidad en función de PGA, velocidad media y turbulencia. Se observa que en el total de los casos de corte el valor medio menos una desviación estándar es mayor a 1, por lo que se considera conservador. Sin embargo, en el caso de momento, se tienen dos pares (entre 12) media – desviación en la Tabla 15 donde no se cumple el criterio descrito.

Conforme a lo anterior, se constata para la torre de 90 metros:

- La regla de combinación de suma algebraica completa (R100) es siempre conservadora.
- La regla de combinación 75% Sismo + 75% Viento resulta siempre conservadora para corte, no siéndolo para momento en 2 de 12 casos, con un valor extremo de media – desviación de 0,9.
- La regla de combinación SRSS resulta siempre conservadora para corte, no siéndolo para momento en 2 de 12 casos, con un valor extremo de media – desviación de 0,9 (es decir, valor de cargas independientes combinadas llega al 90% del valor obtenido en el análisis integrado directo).

Conforme a lo anterior, se considera que las reglas de combinación 75%+75% y SRSS son suficientemente conservadoras como para ser aplicadas en la torre de 90 m.

## Resultados Torre 120 m

Las siguientes tablas reproducen los resultados del párrafo anterior, esta vez para el caso de la torre de 120 m.

**Tabla 17 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa)**

Nivel Confianza	R100 Turbulencia A		R100 Turbulencia B		R100 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,38	0,12	1,38	0,10	1,42	0,11
95%	1,62	0,10	1,62	0,10	1,64	0,09
99%	1,54	0,10	1,53	0,11	1,53	0,11
100%	1,29	0,08	1,27	0,06	1,26	0,08

**Tabla 18 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

Nivel Confianza	R75 Turbulencia A		R75 Turbulencia B		R75 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,04	0,09	1,04	0,07	1,06	0,08
95%	1,22	0,08	1,22	0,07	1,23	0,07
99%	1,15	0,07	1,15	0,08	1,15	0,08
100%	0,97	0,06	0,95	0,05	0,94	0,06

**Tabla 19 Resultados Torre 120 m – Corte Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )**

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,03	0,06	1,03	0,03	1,06	0,03
95%	1,18	0,08	1,18	0,07	1,20	0,07
99%	1,13	0,06	1,13	0,06	1,13	0,06
100%	0,95	0,04	0,94	0,04	0,93	0,04

**Tabla 20 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa)**

Nivel Confianza	R100 Turbulencia A		R100 Turbulencia B		R100 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,13	0,13	1,11	0,06	1,14	0,08
95%	1,32	0,16	1,31	0,12	1,36	0,12
99%	1,35	0,15	1,36	0,11	1,39	0,11
100%	1,27	0,08	1,26	0,08	1,29	0,08

**Tabla 21 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

Nivel Confianza	R75 Turbulencia A		R75 Turbulencia B		R75 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	0,84	0,10	0,83	0,05	0,85	0,06
95%	0,99	0,12	0,99	0,09	1,02	0,09
99%	1,01	0,11	1,02	0,08	1,04	0,08
100%	0,95	0,06	0,95	0,06	0,97	0,06

**Tabla 22 Resultados Torre 120 m – Momento Basal Combinación RSRSS**  
( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	0,98	0,07	0,97	0,04	0,99	0,02
95%	1,04	0,08	1,03	0,04	1,06	0,04
99%	1,04	0,07	1,05	0,03	1,06	0,04
100%	0,99	0,07	0,98	0,09	0,99	0,10

A partir de los resultados mostrados, se puede concluir para la Torre de 120 m:

- En el total de los casos estudiados tanto para corte como para momento, el indicador R100 resultó conservador, considerándose como tal que su valor medio menos una desviación estándar es mayor o igual a 1, es decir, sumar máximos de resultados individuales resulta siempre más conservador que analizar el valor del resultado integrado. Se observa la variación que este indicador no es significativamente dependiente del PGA de los registros sísmicos, de la velocidad media del viento o del nivel de turbulencia del viento.
- El indicador R75, al igual que el caso anterior, no presenta variaciones significativas en función de PGA, velocidad media del viento o nivel de turbulencia. Para el caso de corte, se tiene que en 6 de 12 casos (Tabla 18) no se cumple el criterio de media – desviación mayor o igual a 1, mientras que en el caso de momento, tal condición no se cumple en ninguno de los 12 casos de la Tabla 21.
- En el caso del indicador RSRSS, se tienen resultados similares en términos de poca variabilidad en función de PGA, velocidad media y turbulencia. Para el caso de corte, se tiene que en 6 de 12 casos (Tabla 19) no se cumple el criterio de media – desviación mayor o igual a 1, mientras que en el caso de momento, tal condición no se cumple en 9 de los 12 casos de la Tabla 22.

Conforme a lo anterior, se constata para la torre de 120 metros:

- La regla de combinación de suma algebraica completa (R100) es siempre conservadora.
- La regla de combinación 75% Sismo + 75% Viento resulta conservadora para corte en 6 de 12 casos (Tabla 18) y en ningún caso para momento (Tabla 21).
- La regla de combinación SRSS resulta conservadora para corte en 6 de 12 casos (Tabla 19) y sólo en 3 casos para momento (Tabla 22).

En función de lo anterior, no se considera que las combinaciones 75%+75% ni SRSS sean suficientemente conservadoras para aplicarlas de manera generalizada en una torre de 120 m de altura.

## Resultados Torre 150 m

Las siguientes tablas reproducen los resultados del párrafo anterior, esta vez para el caso de la torre de 150 m.

**Tabla 23 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa)**

Nivel Confianza	R100 Turbulencia A		R100 Turbulencia B		R100 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,37	0,09	1,37	0,07	1,41	0,08
95%	1,47	0,07	1,46	0,06	1,47	0,06
99%	1,48	0,08	1,47	0,07	1,47	0,08
100%	1,32	0,07	1,27	0,06	1,31	0,06

**Tabla 24 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

Nivel Confianza	R75 Turbulencia A		R75 Turbulencia B		R75 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,02	0,07	1,02	0,05	1,06	0,06
95%	1,10	0,05	1,09	0,04	1,10	0,04
99%	1,11	0,06	1,10	0,06	1,10	0,06
100%	0,99	0,05	0,96	0,05	0,99	0,04

**Tabla 25 Resultados Torre 150 m – Corte Basal Combinación RSRSS ( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )**

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,01	0,04	1,01	0,02	1,04	0,03
95%	1,06	0,05	1,06	0,04	1,07	0,03
99%	1,09	0,04	1,08	0,04	1,09	0,04
100%	0,98	0,06	0,96	0,07	0,99	0,05

**Tabla 26 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación R100  
(Suma Algebraica Directa)**

Nivel Confianza	R100 Turbulencia A		R100 Turbulencia B		R100 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	1,13	0,13	1,11	0,07	1,15	0,08
95%	1,27	0,15	1,26	0,11	1,30	0,10
99%	1,33	0,17	1,34	0,12	1,38	0,11
100%	1,31	0,11	1,24	0,11	1,33	0,06

**Tabla 27 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación R75  
(75% Sismo + 75% Viento)**

Nivel Confianza	R75 Turbulencia A		R75 Turbulencia B		R75 Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	0,85	0,10	0,83	0,05	0,86	0,06
95%	0,95	0,11	0,94	0,08	0,98	0,08
99%	1,00	0,13	1,00	0,09	1,03	0,08
100%	0,98	0,09	0,93	0,08	1,00	0,05

**Tabla 28 Resultados Torre 150 m – Momento Basal Combinación RSRSS  
( $\sqrt{\text{Sismo}^2 + \text{Viento}^2}$ )**

Nivel Confianza	RSRSS Turbulencia A		RSRSS Turbulencia B		RSRSS Turbulencia C	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
50%	0,98	0,07	0,97	0,04	1,00	0,02
95%	1,03	0,08	1,01	0,04	1,04	0,02
99%	1,04	0,08	1,04	0,04	1,06	0,03
100%	1,02	0,08	0,96	0,09	1,02	0,07

A partir de los resultados mostrados, se puede concluir para la Torre de 150 m:

- En el total de los casos estudiados tanto para corte como para momento, el indicador R100 resultó conservador, considerándose como tal que su valor medio menos una desviación estándar es mayor o igual a 1, es decir, sumar máximos de resultados individuales resulta siempre más conservador que analizar el valor del resultado integrado. Se observa la variación que este indicador no es significativamente dependiente del PGA de los registros sísmicos, de la velocidad media del viento o del nivel de turbulencia del viento.
- El indicador R75, al igual que el caso anterior, no presenta variaciones significativas en función de PGA, velocidad media del viento o nivel de turbulencia. Para el caso de corte, se tiene que en 7 de 12 casos (Tabla 24) no se cumple el criterio de media – desviación mayor o igual a 1, mientras que en el caso de momento, tal condición no se cumple en ninguno de los 12 casos de la Tabla 27.
- En el caso del indicador RSRSS, se tienen resultados similares en términos de poca variabilidad en función de PGA, velocidad media y turbulencia. Para el caso de corte, se tiene que en 7 de 12 casos (Tabla 25) no se cumple el criterio de media – desviación mayor o igual a 1, mientras que en el caso de momento, tal condición no se cumple en 9 de los 12 casos de la Tabla 28.

Conforme a lo anterior, se constata para la torre de 150 metros:

- La regla de combinación de suma algebraica completa (R100) es siempre conservadora.
- La regla de combinación 75% Sismo + 75% Viento resulta conservadora para corte en 7

de 12 casos (Tabla 24) y en ningún caso para momento (Tabla 27).

- La regla de combinación SRSS resulta conservadora para corte en 7 de 12 casos (Tabla 25) y sólo en 3 casos para momento (Tabla 28).

En función de lo anterior, no se considera que las combinaciones 75%+75% ni SRSS sean suficientemente conservadoras para aplicarlas de manera generalizada en una torre de 120 m de altura.

# Capítulo 6

## Resumen, Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se resumen los resultados obtenidos, concluyendo a partir de ello respecto a la validez de la hipótesis planteada para la presente tesis, y desarrollando además recomendaciones para estudios futuros.

### 6.1 Resumen y Conclusiones

A la luz del trabajo desarrollado y los resultados obtenidos, se tiene:

- El trabajo desarrollado extiende el conocimiento teórico asociado a la combinación de cargas sísmicas y operacionales para el diseño estructural de aerogeneradores, incluyendo un volumen significativo de simulaciones numéricas para sismos subductivos chilenos (no presentes en la bibliografía estudiada), además de la consideración estadística de los valores de diseño, es decir, considerando niveles de confianza y no únicamente valores máximos de series de tiempo, lo cual tampoco se encontró en la bibliografía estudiada.
- En términos generales, el trabajo desarrollado compara los resultados de la suma de resultados independientes para cargas sísmicas y operacionales (viento) mediante 3 reglas distintas de combinación, con los resultados de un análisis tiempo historia donde se consideran de manera simultánea ambas sollicitaciones.
- Con el objetivo de establecer parámetros cuantitativos para la comparación de estas reglas de combinación, se definieron indicadores  $R_{100}$ ,  $R_{75}$  y  $RSR_{SS}$ , que resumen la relación entre la suma de resultados calculados independientemente con el análisis integrados, para casos de suma algebraica directa ( $R_{100}$ ), suma de casos ponderados en un 75% ( $R_{75}$ ) y raíz de suma de cuadrados ( $RSR_{SS}$ ). De esta manera, un indicador mayor o igual a 1 indicará que la suma de resultados independientes -con la regla de combinación puntualmente analizada- será conservadora frente al análisis integrado directo.
- El análisis numérico consideró una serie de combinaciones entre distintos escenarios de sismo, definidos por registros reales de 3 sismos subductivos de magnitud mayor a 8 Mw, escalados para tener 4 niveles de PGA en cada uno. De manera similar, se consideró escenarios de carga de viento, es decir operacional, para 7 velocidades medias de viento y 3 niveles de turbulencia. La variación de parámetros antes descrita para las cargas de sismo y viento asegura que las simulaciones numéricas desarrolladas cubren un amplio rango de escenarios posibles. Sin embargo, en todos los casos estudiados se asume la ocurrencia simultánea de las cargas, es decir, no se considera la probabilidad de ocurrencia conjunta del nivel de sismo y viento analizado. De esta manera, los resultados obtenidos tienen un margen de seguridad adicional, pudiendo considerarse en una etapa posterior un análisis de riesgo que estime la probabilidad de ocurrencia simultánea de un determinado nivel de sismo y viento, reduciendo así la sollicitación de diseño.



- En todos los casos estudiados, se consideró que las direcciones principales de viento y sismo son coincidentes, constituyendo esto otro nivel de seguridad, al asumirse en todos los escenarios la simultaneidad no sólo de ocurrencia, sino también de dirección principal de solicitaciones.
- Se estudió un tipo modelo de aerogenerador, en conjunto con 3 torres de soporte representativas de distintas alturas, similares a proyectos efectivamente materializados o en desarrollo en Chile. Si bien la respuesta del aerogenerador como conjunto es dependiente de la configuración del total de sus partes, el enfoque utilizado es consistente con la práctica de la industria, donde se utilizan equipos generadores tipo, con torres adaptadas a las condiciones de sitio del proyecto.
- Si bien el diseño sísmico de aerogeneradores involucra el análisis de componentes mecánicos y de la configuración de torre en distintas elevaciones, el estudio se centró en las principales cargas de diseño asociadas a solicitaciones horizontales, correspondientes al corte y momento basal en la torre.
- El análisis desarrollado no consideró interacción suelo estructura, lo que puede resultar relevante en suelos blandos. Si bien el estudio presentado no incluye este posible efecto, debe considerarse que en la mayoría de los casos la incorporación de esta interacción resulta en una reducción de cargas, resultando por tanto conservadora su omisión.
- Para todos los casos, se analizó 4 niveles de confianza (50%, 95%, 99% y 100%), con el objetivo de reunir información con un nivel de certeza mayor a la simple combinación de máximos absolutos. Para efectos de validación de la hipótesis de combinación, en todos los casos se considera el 95% de confianza, siendo los restantes resultados parte del análisis estadístico de respaldo.
- En el total de los casos estudiados, el indicador R100 resultó conservador, considerándose como tal que su valor medio menos una desviación estándar es mayor a 1. Se observa la variación que este indicador no es significativamente dependiente del PGA de los registros sísmicos, de la velocidad media del viento o del nivel de turbulencia del viento. El indicador R100 es decreciente en función de la altura de la torre, teniendo como caso crítico un valor de 1,13 ( $\sigma=0,13$ ) para la altura de 150 m.
- El indicador R75, al igual que el caso anterior, no presenta variaciones significativas en función de PGA, velocidad media del viento o nivel de turbulencia. Se observa, eso sí, una marcada disminución en función de la altura de la torre. En el caso de la torre de 90 m, el valor mínimo del indicador es 1,14 ( $\sigma=0,06$ ), mientras que para la torre de 120 m se tiene 0,99 ( $\sigma=0,12$ ) y para la torre de 150 m se tiene 0,95 ( $\sigma=0,12$ ). Tomando como criterio conservador que  $(R - \sigma) > 1$ , es posible concluir que la regla de combinación es apropiada para la torre de 90 m, existiendo un punto intermedio entre 90 y 120 m donde dicho criterio deja de cumplirse.
- En el caso del indicador RSRSS, se tienen resultados similares en términos de poca variabilidad en función de PGA, velocidad media y turbulencia, encontrándose también una fuerte dependencia de la altura de la torre. Se tiene que el caso de la torre de 90 m, el valor mínimo del indicador es 1,11 ( $\sigma=0,05$ ), mientras que para la torre de 120 m resulta 1,04 ( $\sigma=0,08$ ) y para la torre de 150 m se tiene 1,03 ( $\sigma=0,12$ ). Con lo anterior, se concluye que la regla SRSS resulta

conservadora (criterio  $(R - \sigma) > 1$ ) para la torre de 90 m, no siendo conclusiva para alturas mayores.

A partir de los resultados anteriores, se tiene que la hipótesis principal de esta tesis, correspondiente a la validez de una regla de combinación reducida para cargas de viento y sismo simultánea en aerogeneradores de torre metálica, es aplicable para equipos con altura de nacelle menor a 100 metros, siendo válido combinar dichas sollicitaciones mediante regla de 75% o raíz de suma de cuadrados SRSS. Para alturas mayores a 100 metros, se tiene que la suma algebraica directa (100% sismo + 100% viento) resulta siempre conservadora, pero sin encontrarse evidencia suficiente para sustentar una combinación menor.

## 6.2 Recomendaciones para Estudios Futuros

A partir del trabajo desarrollado en la presente tesis, y los resultados entregados, se recomienda el desarrollo de nuevos estudios, que incluyan los siguientes aspectos:

- Análisis de combinaciones de carga para aerogeneradores con torre de hormigón armado.
- Análisis de simultaneidad de ocurrencia de sismo y viento de diseño (los resultados de la presente tesis consideran que las cargas ya ocurren de manera simultánea). El análisis de esta simultaneidad en el largo plazo podría permitir un análisis de riesgo en la vida útil de un proyecto, eventualmente reduciendo cargas o bien entregando información más completa a las distintas partes interesadas.
- Análisis de simultaneidad en términos de direcciones. Este trabajo consideró que en todos los casos, la dirección del sismo es coincidente con la dirección del viento.
- Análisis de combinaciones de carga y en respuesta sísmica en general al considerar interacción suelo estructura. Este trabajo considero, en todos los casos, las torres como empotradas.
- Análisis de combinaciones reducidas para torres metálicas de altura superior a 100 metros. Si bien se tiene que las combinaciones analizadas (75% y SRSS) no son directamente aplicables para torres de altura sobre 100 metros, si se encontró que la suma algebraica directa de sismo y viento siempre resulta conservadora, por lo que podría estudiarse una regla intermedia, por ejemplo 85%, que permita una reducción de costos segura desde el punto de vista estructural.
- Instrumentación de proyectos a escala completa, para validación de parámetros de diseño, como por ejemplo amortiguamiento de equipo detenido versus operando, así como para la validación de respuesta sísmica obtenida mediante análisis multicuerpo.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- [1] IRENA, «Wind Energy,» [En línea]. Available: <https://www.irena.org/wind>. [Último acceso: 29 03 2021].
- [2] G. d. Chile, «Energía Eólica,» [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>. [Último acceso: 29 03 2021].
- [3] I. E. Commission, IEC 61400-1 Edition 4 Wind Energy Generation Systems. Part 1: Design Requirements., 2019.
- [4] DNVGL-RP-0585. Seismic Design of Wind Power Plants. DNV-GL Recommended Practice, DNV-GL, 2021.
- [5] ASCE/AWEA RP2011. Recommended Practice for Compliance of Large Land-based Wind Turbine Support Structures, American Society of Civil Engineers, 2011.
- [6] I. Prowell, “An Experimental and Numerical Study of Wind Turbine Seismic Behavior”. Ph.D. Thesis Disertation, UC San Diego, 2011.
- [7] M. P. I. Asareh, «“A Simplified Approach for Implicitly Considering Aerodynamics in the Seismic Response of Utility Scale Wind Turbines”», de *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012.
- [8] M. Asareh, “Dynamic Behavior of Operational Wind Turbines Considering Aerodynamic and Seismic Load Interaction”. Ph.D. Thesis Disertation, Missouri University of Science and Technology, 2011.
- [9] M. P. I. Asareh, Seismic Loading for FAST, University of Science and Technology, 2011.
- [10] IEC 61400-6 Edition 1 2020-04. Wind Energy Generation Systems. Part 6: Tower and Foundation Design Requirements., International Electrotechnical Commission., 2020.
- [11] DNVGL-ST-0126. Support Structures for Wind Turbines., DNVGL, 2016.
- [12] DNVGL-SE-0190. Project Certification of Wind Power Plants, DNV-GL , 2015.
- [13] DNVGL-SE-0437. Load and Site Conditions for Wind Turbines., DNV-GL, 2016.
- [14] S. W. Ishihara. T., “Numerical and Theoretical Study on Seismic Response of Wind Turbines”, University of Tokyo, 2008.
- [15] I. T., “Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structure and Foundations”., Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), 2010.
- [16] Manual de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad de México, 2015.
- [17] ETG-1015 Especificaciones Técnicas Generales Diseño Sísmico, ENDESA, 1987.
- [18] NCh.2369 Of.2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, Instituto Nacional de Normalización (INN), 2003.
- [19] K. Holm-Jørgensen, Nonlinear Multibody Dynamics of Wind Turbines. DCE Thesis, No. 19. 2009., Department of Civil Engineering, Aalborg University., 2019.
- [20] J. B. M. Jonkman, FAST User’s Guide., National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/EL-500-38230, 2005.
- [21] J. B. S. M. W. S. G. Jonkman, “Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development”. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-500-38060., 2009.
- [22] «Wind Power,» [En línea]. Available: <https://www.accessscience.com/content/wind-power/746400>. [Último acceso: 21 6 20].
- [23] J. K. L. Jonkman, Technical Report. “TurbSim User’s Guide: Version 1.06.00”, National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [24] B. Idini, “Curvas de Atenuación para Terremotos Intraplaca e Interplaca en la Zona de Subducción Chilena”. Tesis para Optar al Grado de Magister en Ingeniería, Mención Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, 2016.
- [25] B. A. Trifunac. M.D., «“A Study on The Duration of Strong Earthquake Ground Motion”», *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 65, n° 3, pp. 581-626, 1975.

- [26] A. I. M. A. T. Y. K. Kawamoto, «“Vibration of Moving Flexible Bodies (Formulation of Dynamics by Using Normal Modes and a Local Observer Frame)”»,» de *Proceedings of DETC99/VIB-8232* , 1999.
- [27] EN1998-4 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, European Committee for Standardisation, 2003.
- [28] I. Prowell, “An Experimental and Numerical Study of Wind Turbine Seismic Behavior”, UC San Diego Electronic Theses and Dissertations, 2011.
- [29] A. D.-O. L. Mensah, «“Probabilistic Combination of Earthquake and Operational Loads for Wind Turbines”,» de *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, 2010.
- [30] FEMA P-58-1 Seismic Performance Assessment of Buildings. Volume 1 – Methodology. Second Edition., Federal Emergency Management Agency, 2018.

# Anexo A

## Metodología de Análisis Multicuerpo No Lineal

En el presente anexo se describe en términos generales la metodología de análisis multicuerpo no lineal empleada en el estudio de aerogeneradores. El alcance de esta tesis no es validar ni complementar el desarrollo de la metodología, por lo que el capítulo presenta solamente un enfoque general, que da cuenta del entendimiento conceptual para el correcto uso de software especializado, y por sobre todo, para la adecuada interpretación de sus resultados.

El uso del análisis multicuerpo se origina en la necesidad de contar con un modelo de análisis que represente adecuadamente el comportamiento global de un elemento que combina elementos individuales flexibles (aspas, torre y componentes mecánicos), con movimiento relativo entre sí, con un costo computacional razonable.

El problema es posible de enfrentar mediante modelos de elementos finitos con análisis fluidodinámico (por ejemplo, mediante plataformas como ANSYS), los que si bien entregan una adecuada representación del fenómeno, requieren tiempos de análisis (incluyendo pre y post procesamiento) hasta ahora demasiado extensos. En el otro extremo, la simplificación típicamente utilizada para el análisis sísmico de la torre y fundaciones, correspondiente a un *stick model* donde no hay elementos rotatorios, y la masa del sistema se asume en un punto en el extremo de la torre, no entrega resultados para diseño de componentes, y no es capaz de predecir el movimiento completo del sistema (giros de aspa, rotación de nacelle respecto a eje vertical ni pitch de aspa respecto a su eje).

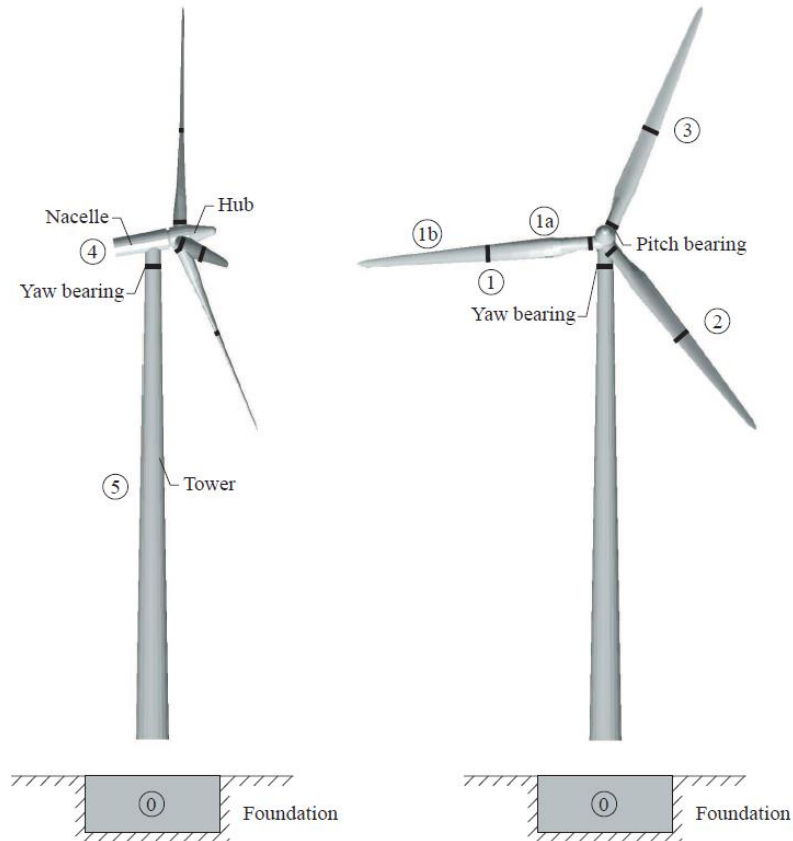
Por otra parte, el uso de software tradicional de análisis estructural no es aplicable, dado que en su mayoría estos programas son capaces de estudiar sistemas con pequeñas deformaciones, limitando los casos no lineales a constitutividad (modelos de degradación) o bien a casos estandarizados de no linealidad geométrica, siendo el ejemplo clásico el pandeo. En el caso de los aerogeneradores, al ser sistemas mecánicos, se tienen conexiones con rotaciones relativas entre elementos, como el giro de las aspas y sus ejes de alta y baja, el movimiento en torno al eje vertical (*yaw*) y el movimiento de las aspas en torno a su propio eje (*pitch*). Asimismo, las aspas, al ser elementos livianos típicamente formados por capas de materiales, incluyendo fibras plásticas y maderas, presentan usualmente deformaciones grandes, más allá del supuesto de aplicabilidad en la posición no deformada que sustenta el análisis lineal.

Conforme a lo anteriormente descrito, el análisis multicuerpo resulta una herramienta adecuada cuando se requiere combinar las cargas aerodinámicas propias de la operación de la turbina con solicitaciones sísmicas para obtener resultados de movimiento y esfuerzos en elementos móviles, con un costo computacional razonable.

En el enfoque multicuerpo, descrito a continuación conforme a Holm-Jørgensen [19], se considera un conjunto de subestructuras, cada una asociada a un marco de referencia móvil, de modo que las deformaciones de cada subestructura sean pequeñas con respecto a ese marco, aplicando por tanto la linealidad para el componente. De esta forma, los grados de libertad no lineales se acotan a singularidades correspondientes a ejes mecánicos principales, como por ejemplo rotor, mecanismo

de *pitch* y mecanismo de *yaw*, mediante la introducción de restricciones (*constraints*) cinemáticos, en particular de tipo rotacional.

De esta manera, el sistema queda definido por la suma de grados de libertad de cada elemento con respecto a su marco de referencia móvil (deformaciones pequeñas, concordantes con el análisis estructural clásico), y por las coordenadas (desplazamiento y rotación) de cada marco móvil con respecto a la referencia absoluta considerada. La Figura A1.1, obtenida de Holm-Jørgensen [19], esquematiza los componentes principales de un aerogenerador (torre, *nacelle* y aspas), conectados mediante *constraints* cinemáticos principales (rotor, *pitch bearing* y *yaw bearing*).



**Figura A.1 Configuración de Elementos Lineales Conectados Mediante Restricciones Cinemáticas para Análisis Multicuerpo No Lineal (Fuente: Holm-Jørgensen [19]).**

Incluso al reducir las grandes deformaciones a unos pocos grados de libertad, las ecuaciones obtenidas mediante la agregación de subestructuras y sus respectivos marcos resultan en sistemas numéricos altamente no lineales. Con el objetivo de minimizar este efecto, Kawamoto [26], citado por Holm-Jørgensen [19], propone el uso de un Marco de Observador Local, donde se permiten pequeños movimientos de cuerpo rígido entre cada subestructura y su marco de referencia, prediciendo y luego corrigiendo paso a paso en el tiempo el movimiento relativo entre ambos. Con este enfoque, las matrices que definen la ecuación de movimiento ya no dependen de los grados de libertad generalizados globales, lo que reduce el tamaño del problema, a costo eso si de ser necesario actualizar dichas matrices en cada paso. Con lo anterior, Holm-Jørgensen define la siguiente ecuación de movimiento para cada subestructura  $i$ :

$$M_i \ddot{y}_i + C_i \dot{y}_i + K_i y_i + B_i^t(y_i) \bar{\lambda}_i = f_i(t)$$

Donde:

- $M_i$  es la matriz de masa de la subestructura respecto a su propio marco de referencia.
- $y_i$  es el vector de grados de libertad de la subestructura, respecto a su propio marco de referencia.
- $C_i$  es la matriz de amortiguamiento de la subestructura, definida como  $C_i = C_{0,i} + 2G_i$ , donde  $C_{0,i}$  es la matriz de amortiguamiento clásica de la subestructura respecto a su marco de referencia, y  $G_i$  es la matriz que da cuenta de fuerzas giroscópicas debidas al movimiento del marco de referencia respecto al origen global. Debe notarse que la matriz  $G_i$  es antisimétrica, por lo que  $C_i$  puede interpretarse como una matriz de amortiguamiento no simétrica para el elemento.
- $K_i$  es una matriz de rigidez de la subestructura, definida como  $K_i = K_{e,i} + \dot{G}_i + D_i + K_{g,i}$ , donde  $K_{e,i}$  es la matriz de rigidez de la subestructura respecto a su marco de referencia,  $D_i$  es la matriz de fuerzas centrífugas respecto a deformaciones elásticas y  $K_{g,i}$  es la matriz de rigidez geométrica. Al igual que en el caso anterior, la matriz del elemento resulta no simétrica, dada la componente asociada a  $\dot{G}_i$ .
- $B_i$  es la matriz de restricciones (*constraints*).
- $\lambda$  corresponde a multiplicadores lagrangianos.
- $f_i(t)$  corresponde al vector de fuerzas sobre los grados de libertad de la subestructura, dado por:

$$f_i(t) = -M_{0,i}^T a_{c,i} - J_{0,i}^T + J_{2,i}^T + Q_{c,i} + Q_{nc,i}$$

Para el cual:

- $M_{0,i}$  es la matriz que representa el efecto inercial de transformaciones.
- $J_{0,i}$  y  $J_{2,i}$  son términos que acoplan la posición de referencia del marco referencial de la subestructura con sus funciones de forma.
- $Q_{c,i}$ ,  $Q_{nc,i}$  son vectores de carga externa.

Una vez definidas las ecuaciones de movimiento para cada subestructura, la ecuación de movimiento del sistema global se logra combinando dichas ecuaciones con los *constraints* cinemáticos descritos, obteniéndose, como ejemplo, para un sistema con dos subestructuras:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 & B_1^T \\ 0 & K_2 & B_2^T \\ B_1 & B_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ b \end{bmatrix}$$

Finalmente, el sistema es resuelto mediante un cálculo numérico tiempo-historia, mediante la combinación de un algoritmo de Newmark con una metodología de actualización paso a paso de las matrices de desplazamiento relativo, en la cual se ajusta la predicción con el resultado del cálculo del paso anterior, conforme a la formulación de Kawamoto [26].



# Anexo B

## Modelamiento y Análisis Estructural

El presente anexo describe los principales aspectos del modelamiento estructural a considerar en el análisis, incluyendo la plataforma de análisis y una descripción funcional del modelo matemático implementado en esta plataforma.

### *Plataforma de Análisis*

El análisis estructural se desarrolla utilizando la plataforma FAST del National Renewable Energy Laboratory [20], complementado con su módulo sísmico desarrollado por Asareh y Prowell [9]. En particular, se utiliza la versión V7 del software, materializada mediante un ejecutable DOS, el cual se corre mediante rutinas MATLAB, las que permiten programar iteraciones modificando los archivos de entrada.

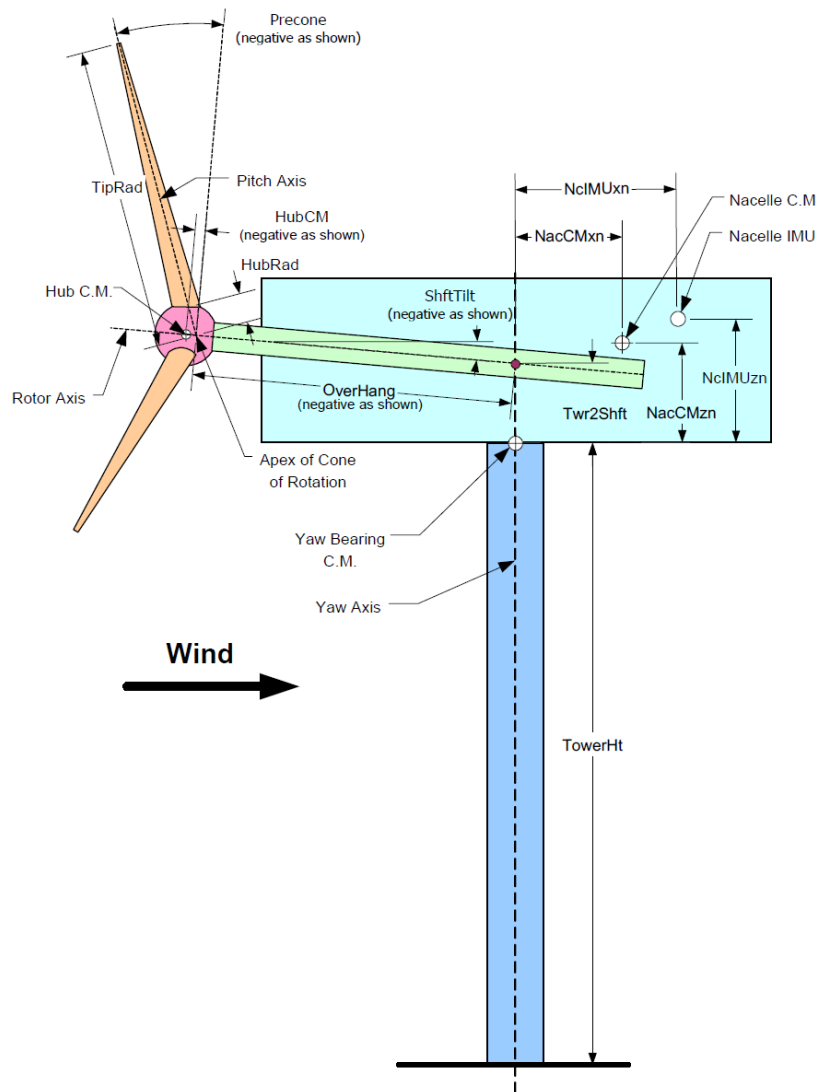
Como parte del desarrollo del módulo sísmico, Asareh y Prowell [9] validaron los resultados contra referencias previamente aceptadas basadas en modelos OpenSees, por lo que para efectos de esta tesis, se considerará que el software está debidamente validado.

### *Descripción Funcional*

La plataforma FAST utiliza la metodología de análisis multicuerpo descrita en el Anexo A de esta tesis, combinándolo con análisis modal tradicional, de manera de limitar los grados de libertad no lineales únicamente a grandes desplazamientos (como giros completos o grandes deformaciones de las aspas). El modelo considera entonces los siguientes grados de libertad, según se describe en el manual de la plataforma [20]:

- 6 GDL (3 desplazamientos y 3 giros) en la base de la torre, con respecto al marco inercial.
- 4 GDL (2 longitudinales y 2 transversales) para la torre. Esto implica que el análisis de la torre no considera compresión o estiramiento, y que el movimiento en un eje sólo se puede describir por dos puntos, lo que permite considerar sólo 2 modos. En torres de gran altura, esto podría significar pérdida de información, al omitir la participación del tercer modo y superiores.
- 1 GDL para la rotación de *nacelle* en torno al eje vertical.
- 1 GDL para el azimut del generador, y 1 GDL para compatibilidad entre generador y reductor (los que permite modelar velocidad variable y flexibilidad del eje).
- 3 GDL para movimiento *flapwise* (eje flexible) de punta de aspas, asociado al primer modo.
- 3 GDL para movimiento *flapwise* (eje flexible) de punta de aspas, asociado al segundo modo.
- 3 GDL para movimiento *edgewise* (eje rígido) de punta de aspas, asociado al primer modo (se desprecia el segundo modo en el eje rígido).

En complemento a los grados de libertad, el programa requiere el ingreso de todas las masas traslacionales y rotacionales. En el caso particular de aspas y torre, se requiere ingresar manualmente los coeficientes que definen las formas modales para los dos primeros modos. La Figura A2.1, extraída del manual del software [20], esquematiza las principales dimensiones consideradas en el modelo de análisis.



**Figura B.1 Dimensiones Esquemáticas Aerogenerador. Fuente: Manual FAST [20].**

En el caso de las solicitaciones basales, el módulo sísmico no introduce aceleraciones (formulación típica de grado de libertad con cambio de variable), sino que fuerzas y momentos a una plataforma basal con masa, a través de un conjunto resorte-amortiguador. Por este motivo, debe siempre considerarse constantes  $k$  y  $c$  suficientemente amplias, tal que la aceleración resultante efectivamente en la base sea compatible con el registro de aceleración deseado. En este caso, además, se utiliza un valor suficientemente alto de masa para la plataforma basal, así como para la rigidez y amortiguamiento, tal que sea posible asumir empotramiento basal, no considerándose en este trabajo efectos de interacción suelo-estructura.

# Anexo C

## Tablas Resultados Torre 90 m

Tabla C.1 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<i>50% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,55	1,24	1,28	1,24	1,32	1,28	1,41
PGA 0,6 g	1,56	1,36	1,41	1,36	1,43	1,39	1,51
PGA 0,8 g	1,53	1,43	1,50	1,45	1,50	1,46	1,57
PGA 1,0 g	1,50	1,47	1,55	1,51	1,55	1,51	1,60
<i>95% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,57	1,47	1,46	1,46	1,52	1,45	1,60
PGA 0,6 g	1,48	1,49	1,51	1,52	1,60	1,55	1,67
PGA 0,8 g	1,41	1,47	1,51	1,54	1,62	1,59	1,67
PGA 1,0 g	1,35	1,43	1,49	1,53	1,61	1,58	1,65
<i>99% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,60	1,52	1,53	1,53	1,61	1,57	1,68
PGA 0,6 g	1,50	1,50	1,52	1,55	1,64	1,63	1,72
PGA 0,8 g	1,42	1,47	1,50	1,53	1,62	1,61	1,69
PGA 1,0 g	1,37	1,44	1,48	1,51	1,59	1,59	1,64
<i>100% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,54	1,42	1,41	1,47	1,44	1,41	1,60
PGA 0,6 g	1,40	1,41	1,40	1,47	1,43	1,41	1,60
PGA 0,8 g	1,32	1,39	1,39	1,45	1,42	1,41	1,57
PGA 1,0 g	1,27	1,38	1,38	1,43	1,41	1,40	1,49

Tabla C.2 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R75

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<i>50% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,16	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	1,05
PGA 0,6 g	1,17	1,02	1,06	1,02	1,07	1,04	1,13
PGA 0,8 g	1,15	1,08	1,12	1,09	1,13	1,10	1,18
PGA 1,0 g	1,12	1,11	1,16	1,14	1,16	1,13	1,20
<i>95% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,18	1,10	1,10	1,09	1,14	1,09	1,20
PGA 0,6 g	1,11	1,12	1,13	1,14	1,20	1,17	1,25
PGA 0,8 g	1,06	1,10	1,14	1,16	1,22	1,19	1,25
PGA 1,0 g	1,02	1,08	1,12	1,15	1,21	1,19	1,24
<i>99% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,20	1,14	1,14	1,15	1,21	1,18	1,26
PGA 0,6 g	1,12	1,13	1,14	1,16	1,23	1,22	1,29
PGA 0,8 g	1,07	1,10	1,13	1,15	1,21	1,21	1,27
PGA 1,0 g	1,03	1,08	1,11	1,13	1,19	1,19	1,23
<i>100% Confianza</i>							
PGA 0,4 g	1,16	1,07	1,06	1,10	1,08	1,06	1,20
PGA 0,6 g	1,05	1,06	1,05	1,10	1,07	1,06	1,20
PGA 0,8 g	<b>0,99</b>	1,05	1,04	1,09	1,07	1,05	1,18
PGA 1,0 g	<b>0,95</b>	1,04	1,03	1,07	1,06	1,05	1,11

**Tabla A3.3 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación RSRSS**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	<b>0,92</b>	1,01	<b>0,98</b>	1,03	<b>0,98</b>	1,06
PGA 0,6 g	1,11	<b>0,97</b>	1,05	1,02	1,05	1,01	1,09
PGA 0,8 g	1,12	1,01	1,08	1,05	1,08	1,04	1,11
PGA 1,0 g	1,13	1,05	1,10	1,08	1,10	1,07	1,14
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	1,04	1,04	1,05	1,10	1,05	1,15
PGA 0,6 g	1,12	1,07	1,07	1,08	1,13	1,10	1,18
PGA 0,8 g	1,11	1,09	1,09	1,10	1,16	1,14	1,20
PGA 1,0 g	1,11	1,10	1,10	1,12	1,17	1,16	1,21
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,18	1,09	1,08	1,09	1,14	1,11	1,19
PGA 0,6 g	1,18	1,11	1,10	1,11	1,16	1,16	1,23
PGA 0,8 g	1,17	1,13	1,12	1,13	1,18	1,18	1,24
PGA 1,0 g	1,15	1,14	1,14	1,14	1,19	1,19	1,23
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,17	1,02	1,01	1,04	1,02	1,00	1,13
PGA 0,6 g	1,12	1,06	1,04	1,08	1,03	1,03	1,15
PGA 0,8 g	1,10	1,10	1,08	1,10	1,06	1,06	1,17
PGA 1,0 g	1,09	1,12	1,10	1,12	1,09	1,09	1,14

**Tabla C.4 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R100**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,43	1,29	1,28	1,26	1,33	1,33	1,40
PGA 0,6 g	1,49	1,42	1,40	1,39	1,45	1,45	1,51
PGA 0,8 g	1,50	1,49	1,49	1,48	1,53	1,52	1,57
PGA 1,0 g	1,48	1,53	1,55	1,54	1,58	1,56	1,60
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,51	1,47	1,45	1,46	1,48	1,55	1,56
PGA 0,6 g	1,44	1,48	1,50	1,51	1,56	1,62	1,63
PGA 0,8 g	1,38	1,45	1,51	1,53	1,59	1,63	1,64
PGA 1,0 g	1,34	1,42	1,49	1,52	1,58	1,61	1,61
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,51	1,52	1,52	1,57	1,66	1,65
PGA 0,6 g	1,45	1,48	1,52	1,53	1,60	1,68	1,67
PGA 0,8 g	1,39	1,45	1,49	1,52	1,59	1,65	1,63
PGA 1,0 g	1,35	1,42	1,47	1,50	1,56	1,61	1,60
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,40	1,39	1,38	1,53	1,38	1,52	1,53
PGA 0,6 g	1,39	1,39	1,39	1,50	1,40	1,52	1,50
PGA 0,8 g	1,32	1,38	1,39	1,48	1,41	1,50	1,49
PGA 1,0 g	1,27	1,35	1,39	1,46	1,40	1,48	1,47

**Tabla C.5 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R75**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	1,05
PGA 0,6 g	1,12	1,07	1,05	1,04	1,09	1,09	1,13
PGA 0,8 g	1,12	1,12	1,12	1,11	1,15	1,14	1,18
PGA 1,0 g	1,11	1,15	1,16	1,16	1,18	1,17	1,20
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,10	1,09	1,09	1,11	1,16	1,17
PGA 0,6 g	1,08	1,11	1,13	1,14	1,17	1,22	1,22
PGA 0,8 g	1,04	1,09	1,13	1,15	1,19	1,22	1,23
PGA 1,0 g	1,00	1,06	1,11	1,14	1,18	1,21	1,21
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	1,13	1,14	1,14	1,18	1,24	1,24
PGA 0,6 g	1,09	1,11	1,14	1,15	1,20	1,26	1,25
PGA 0,8 g	1,04	1,09	1,12	1,14	1,19	1,23	1,23
PGA 1,0 g	1,01	1,07	1,10	1,12	1,17	1,21	1,20
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,05	1,04	1,04	1,15	1,03	1,14	1,14
PGA 0,6 g	1,04	1,04	1,04	1,13	1,05	1,14	1,13
PGA 0,8 g	<b>0,99</b>	1,04	1,04	1,11	1,06	1,13	1,12
PGA 1,0 g	<b>0,95</b>	1,01	1,04	1,09	1,05	1,11	1,10

**Tabla C.6 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación RSRSS**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,02	<b>0,96</b>	1,01	1,00	1,04	1,02	1,06
PGA 0,6 g	1,06	1,02	1,04	1,04	1,07	1,05	1,08
PGA 0,8 g	1,09	1,06	1,08	1,08	1,10	1,08	1,11
PGA 1,0 g	1,11	1,09	1,10	1,10	1,12	1,10	1,13
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,04	1,04	1,04	1,06	1,11	1,11
PGA 0,6 g	1,10	1,07	1,07	1,07	1,10	1,15	1,15
PGA 0,8 g	1,10	1,09	1,09	1,10	1,14	1,17	1,18
PGA 1,0 g	1,10	1,09	1,10	1,11	1,15	1,18	1,19
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,08	1,07	1,08	1,11	1,17	1,17
PGA 0,6 g	1,15	1,11	1,10	1,10	1,14	1,20	1,20
PGA 0,8 g	1,15	1,13	1,12	1,12	1,16	1,21	1,21
PGA 1,0 g	1,14	1,14	1,13	1,14	1,18	1,22	1,21
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	1,02	<b>0,98</b>	1,09	<b>0,98</b>	1,08	1,08
PGA 0,6 g	1,14	1,08	1,03	1,11	1,03	1,11	1,10
PGA 0,8 g	1,12	1,11	1,08	1,14	1,07	1,14	1,12
PGA 1,0 g	1,11	1,12	1,11	1,16	1,10	1,16	1,14

**Tabla C.7 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,42	1,29	1,26	1,33	1,36	1,39
PGA 0,6 g	1,57	1,53	1,42	1,38	1,45	1,48	1,51
PGA 0,8 g	1,55	1,58	1,51	1,48	1,53	1,56	1,57
PGA 1,0 g	1,52	1,60	1,57	1,55	1,59	1,60	1,60
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,50	1,50	1,44	1,45	1,51	1,55	1,56
PGA 0,6 g	1,43	1,49	1,48	1,51	1,58	1,61	1,63
PGA 0,8 g	1,37	1,45	1,48	1,52	1,60	1,62	1,62
PGA 1,0 g	1,32	1,41	1,46	1,51	1,58	1,60	1,60
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,50	1,52	1,50	1,51	1,60	1,65	1,67
PGA 0,6 g	1,44	1,49	1,49	1,51	1,60	1,65	1,68
PGA 0,8 g	1,38	1,45	1,47	1,50	1,58	1,62	1,64
PGA 1,0 g	1,33	1,41	1,45	1,48	1,55	1,59	1,60
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,45	1,46	1,49	1,41	1,49	1,42	1,60
PGA 0,6 g	1,40	1,44	1,47	1,41	1,46	1,41	1,58
PGA 0,8 g	1,32	1,42	1,45	1,40	1,44	1,40	1,57
PGA 1,0 g	1,26	1,36	1,43	1,39	1,43	1,39	1,54

**Tabla C.8 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	1,06	<b>0,97</b>	<b>0,94</b>	<b>1,00</b>	1,02	1,04
PGA 0,6 g	1,17	1,15	1,07	1,04	1,09	1,11	1,13
PGA 0,8 g	1,16	1,19	1,13	1,11	1,15	1,17	1,18
PGA 1,0 g	1,14	1,20	1,17	1,16	1,19	1,20	1,20
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,12	1,08	1,09	1,14	1,16	1,17
PGA 0,6 g	1,07	1,12	1,11	1,13	1,19	1,21	1,22
PGA 0,8 g	1,02	1,09	1,11	1,14	1,20	1,22	1,22
PGA 1,0 g	<b>0,99</b>	1,06	1,10	1,13	1,18	1,20	1,20
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,14	1,12	1,13	1,20	1,24	1,25
PGA 0,6 g	1,08	1,11	1,12	1,13	1,20	1,24	1,26
PGA 0,8 g	1,03	1,09	1,10	1,12	1,19	1,21	1,23
PGA 1,0 g	1,00	1,06	1,09	1,11	1,17	1,19	1,20
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	1,10	1,12	1,06	1,12	1,06	1,20
PGA 0,6 g	1,05	1,08	1,10	1,05	1,10	1,06	1,19
PGA 0,8 g	<b>0,99</b>	1,06	1,09	1,05	1,08	1,05	1,18
PGA 1,0 g	<b>0,95</b>	1,02	1,08	1,04	1,07	1,04	1,15

**Tabla C.9 Resultados Torre 90 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación RSRSS**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	1,06	1,03	1,01	1,04	1,04	1,05
PGA 0,6 g	1,11	1,09	1,06	1,05	1,07	1,08	1,08
PGA 0,8 g	1,13	1,12	1,09	1,08	1,10	1,11	1,11
PGA 1,0 g	1,14	1,14	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,06	1,03	1,04	1,08	1,10	1,11
PGA 0,6 g	1,10	1,09	1,05	1,07	1,12	1,14	1,16
PGA 0,8 g	1,10	1,10	1,08	1,09	1,15	1,17	1,18
PGA 1,0 g	1,10	1,10	1,09	1,11	1,16	1,18	1,19
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	1,10	1,06	1,07	1,13	1,17	1,18
PGA 0,6 g	1,15	1,13	1,09	1,09	1,15	1,18	1,21
PGA 0,8 g	1,15	1,14	1,11	1,11	1,17	1,20	1,22
PGA 1,0 g	1,15	1,15	1,13	1,13	1,18	1,21	1,23
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,12	1,08	1,06	1,01	1,06	1,01	1,13
PGA 0,6 g	1,15	1,12	1,09	1,04	1,07	1,03	1,16
PGA 0,8 g	1,12	1,15	1,12	1,08	1,10	1,06	1,19
PGA 1,0 g	1,11	1,14	1,14	1,10	1,12	1,09	1,20

**Tabla C.10 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100**

<b>Velocidad Media</b>	<b>6 m/s</b>	<b>8 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>12 m/s</b>	<b>14 m/s</b>	<b>16 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,48	1,09	1,15	1,12	1,20	1,16	1,28
PGA 0,6 g	1,57	1,20	1,25	1,21	1,30	1,26	1,40
PGA 0,8 g	1,61	1,30	1,33	1,29	1,38	1,36	1,50
PGA 1,0 g	1,63	1,38	1,41	1,37	1,45	1,44	1,58
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,69	1,41	1,39	1,38	1,41	1,34	1,51
PGA 0,6 g	1,70	1,52	1,51	1,50	1,55	1,48	1,66
PGA 0,8 g	1,67	1,60	1,59	1,59	1,66	1,59	1,76
PGA 1,0 g	1,62	1,61	1,64	1,64	1,73	1,67	1,84
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,85	1,59	1,57	1,53	1,56	1,48	1,64
PGA 0,6 g	1,76	1,67	1,67	1,65	1,73	1,65	1,81
PGA 0,8 g	1,66	1,69	1,71	1,72	1,83	1,76	1,92
PGA 1,0 g	1,58	1,67	1,71	1,74	1,88	1,82	1,99
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,74	1,58	1,48	1,50	1,53	1,44	1,59
PGA 0,6 g	1,63	1,55	1,50	1,53	1,55	1,44	1,70
PGA 0,8 g	1,56	1,52	1,50	1,55	1,55	1,44	1,78
PGA 1,0 g	1,52	1,49	1,48	1,54	1,56	1,43	1,76

**Tabla C.11 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A –  
Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	<b>0,82</b>	<b>0,87</b>	<b>0,84</b>	<b>0,90</b>	<b>0,87</b>	<b>0,96</b>
PGA 0,6 g	1,18	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>	1,05
PGA 0,8 g	1,21	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	1,03	1,02	1,12
PGA 1,0 g	1,22	1,04	1,06	1,03	1,09	1,08	1,18
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,27	1,06	1,05	1,03	1,06	1,00	1,13
PGA 0,6 g	1,28	1,14	1,13	1,12	1,16	1,11	1,24
PGA 0,8 g	1,25	1,20	1,19	1,19	1,24	1,20	1,32
PGA 1,0 g	1,21	1,21	1,23	1,23	1,30	1,26	1,38
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,39	1,19	1,18	1,15	1,17	1,11	1,23
PGA 0,6 g	1,32	1,26	1,26	1,24	1,29	1,24	1,36
PGA 0,8 g	1,24	1,27	1,28	1,29	1,38	1,32	1,44
PGA 1,0 g	1,18	1,25	1,28	1,31	1,41	1,37	1,49
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,31	1,18	1,11	1,12	1,15	1,08	1,19
PGA 0,6 g	1,23	1,16	1,13	1,15	1,16	1,08	1,27
PGA 0,8 g	1,17	1,14	1,12	1,16	1,17	1,08	1,34
PGA 1,0 g	1,14	1,12	1,11	1,16	1,17	1,08	1,32

**Tabla C.12 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A –  
Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>	1,01	<b>0,96</b>	1,05
PGA 0,6 g	1,12	<b>0,91</b>	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	1,03	<b>0,99</b>	1,08
PGA 0,8 g	1,14	<b>0,95</b>	1,02	1,00	1,05	1,02	1,11
PGA 1,0 g	1,17	<b>0,99</b>	1,05	1,03	1,08	1,05	1,14
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,20	1,03	1,05	1,05	1,09	1,02	1,15
PGA 0,6 g	1,22	1,08	1,09	1,09	1,13	1,07	1,20
PGA 0,8 g	1,24	1,13	1,13	1,13	1,18	1,13	1,25
PGA 1,0 g	1,23	1,16	1,16	1,16	1,22	1,18	1,30
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,32	1,13	1,13	1,12	1,15	1,08	1,20
PGA 0,6 g	1,30	1,19	1,18	1,17	1,23	1,17	1,29
PGA 0,8 g	1,28	1,23	1,22	1,22	1,30	1,25	1,36
PGA 1,0 g	1,25	1,24	1,24	1,25	1,34	1,30	1,42
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,24	1,12	1,06	1,08	1,13	1,05	1,17
PGA 0,6 g	1,20	1,10	1,06	1,08	1,10	1,02	1,21
PGA 0,8 g	1,19	1,10	1,07	1,10	1,10	1,02	1,26
PGA 1,0 g	1,20	1,11	1,09	1,11	1,12	1,03	1,26



**Tabla C.13 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,31	1,14	1,16	1,14	1,21	1,20	1,27
PGA 0,6 g	1,44	1,26	1,25	1,23	1,31	1,31	1,38
PGA 0,8 g	1,52	1,37	1,33	1,32	1,40	1,40	1,49
PGA 1,0 g	1,56	1,46	1,41	1,40	1,48	1,48	1,57
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,60	1,45	1,39	1,39	1,39	1,46	1,47
PGA 0,6 g	1,64	1,55	1,50	1,50	1,52	1,60	1,62
PGA 0,8 g	1,63	1,61	1,58	1,59	1,62	1,70	1,73
PGA 1,0 g	1,59	1,62	1,63	1,64	1,69	1,77	1,80
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,73	1,62	1,57	1,54	1,53	1,63	1,60
PGA 0,6 g	1,67	1,68	1,67	1,65	1,68	1,82	1,78
PGA 0,8 g	1,60	1,67	1,71	1,72	1,78	1,92	1,89
PGA 1,0 g	1,54	1,65	1,71	1,74	1,83	1,96	1,94
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,42	1,41	1,39	1,58	1,57	1,56	1,50
PGA 0,6 g	1,40	1,41	1,40	1,56	1,66	1,56	1,53
PGA 0,8 g	1,39	1,41	1,40	1,55	1,62	1,56	1,56
PGA 1,0 g	1,38	1,40	1,40	1,53	1,59	1,55	1,58

**Tabla C.14 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,98</b>	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>	<b>0,86</b>	<b>0,91</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>
PGA 0,6 g	1,08	<b>0,95</b>	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	1,04
PGA 0,8 g	1,14	1,03	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	1,05	1,05	1,11
PGA 1,0 g	1,17	1,09	1,06	1,05	1,11	1,11	1,18
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,20	1,09	1,04	1,04	1,04	1,10	1,10
PGA 0,6 g	1,23	1,16	1,13	1,13	1,14	1,20	1,21
PGA 0,8 g	1,22	1,21	1,19	1,19	1,22	1,28	1,30
PGA 1,0 g	1,19	1,22	1,22	1,23	1,27	1,33	1,35
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,30	1,22	1,17	1,15	1,15	1,22	1,20
PGA 0,6 g	1,25	1,26	1,25	1,24	1,26	1,36	1,33
PGA 0,8 g	1,20	1,26	1,28	1,29	1,34	1,44	1,41
PGA 1,0 g	1,15	1,24	1,28	1,30	1,37	1,47	1,45
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,06	1,04	1,19	1,17	1,17	1,13
PGA 0,6 g	1,05	1,06	1,05	1,17	1,24	1,17	1,15
PGA 0,8 g	1,04	1,05	1,05	1,16	1,22	1,17	1,17
PGA 1,0 g	1,04	1,05	1,05	1,15	1,20	1,16	1,18

**Tabla C.15 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	1,02	<b>0,99</b>	1,03
PGA 0,6 g	1,02	<b>0,96</b>	1,00	1,00	1,04	1,02	1,06
PGA 0,8 g	1,08	1,00	1,03	1,03	1,07	1,05	1,10
PGA 1,0 g	1,12	1,04	1,05	1,05	1,10	1,08	1,13
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,05	1,04	1,05	1,06	1,11	1,10
PGA 0,6 g	1,18	1,10	1,08	1,09	1,10	1,15	1,16
PGA 0,8 g	1,21	1,15	1,12	1,13	1,15	1,21	1,22
PGA 1,0 g	1,22	1,17	1,15	1,16	1,20	1,25	1,27
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,24	1,15	1,13	1,11	1,12	1,19	1,16
PGA 0,6 g	1,24	1,20	1,18	1,17	1,19	1,29	1,26
PGA 0,8 g	1,24	1,23	1,22	1,22	1,26	1,36	1,34
PGA 1,0 g	1,23	1,24	1,24	1,25	1,31	1,41	1,40
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,02	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	1,14	1,14	1,13	1,10
PGA 0,6 g	1,05	1,01	<b>0,99</b>	1,11	1,17	1,10	1,09
PGA 0,8 g	1,08	1,04	1,00	1,10	1,15	1,11	1,11
PGA 1,0 g	1,11	1,07	1,03	1,11	1,15	1,12	1,13

**Tabla C.16 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C –  
Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,42	1,27	1,17	1,14	1,20	1,22	1,25
PGA 0,6 g	1,55	1,40	1,26	1,22	1,30	1,33	1,37
PGA 0,8 g	1,62	1,50	1,35	1,31	1,39	1,43	1,47
PGA 1,0 g	1,65	1,58	1,42	1,38	1,47	1,52	1,56
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,63	1,50	1,40	1,39	1,43	1,47	1,49
PGA 0,6 g	1,63	1,59	1,51	1,51	1,56	1,61	1,64
PGA 0,8 g	1,61	1,63	1,58	1,59	1,66	1,72	1,75
PGA 1,0 g	1,57	1,63	1,62	1,64	1,73	1,78	1,81
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,73	1,67	1,56	1,56	1,58	1,63	1,69
PGA 0,6 g	1,66	1,70	1,64	1,67	1,73	1,80	1,85
PGA 0,8 g	1,59	1,68	1,67	1,72	1,80	1,90	1,95
PGA 1,0 g	1,53	1,64	1,68	1,73	1,83	1,93	2,00
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,55	1,53	1,64	1,46	1,52	1,51	1,64
PGA 0,6 g	1,49	1,50	1,63	1,45	1,50	1,53	1,67
PGA 0,8 g	1,45	1,48	1,60	1,45	1,51	1,55	1,66
PGA 1,0 g	1,43	1,46	1,57	1,44	1,53	1,56	1,65

**Tabla C.17 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C –  
Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	<b>0,95</b>	<b>0,88</b>	<b>0,85</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>
PGA 0,6 g	1,16	1,05	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	1,00	1,03
PGA 0,8 g	1,22	1,12	1,01	<b>0,98</b>	1,04	1,07	1,10
PGA 1,0 g	1,24	1,18	1,07	1,04	1,10	1,14	1,17
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,22	1,12	1,05	1,04	1,07	1,10	1,12
PGA 0,6 g	1,22	1,19	1,13	1,13	1,17	1,21	1,23
PGA 0,8 g	1,21	1,23	1,19	1,20	1,25	1,29	1,31
PGA 1,0 g	1,18	1,23	1,21	1,23	1,30	1,34	1,36
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,30	1,25	1,17	1,17	1,18	1,22	1,26
PGA 0,6 g	1,25	1,28	1,23	1,25	1,30	1,35	1,39
PGA 0,8 g	1,20	1,26	1,25	1,29	1,35	1,42	1,46
PGA 1,0 g	1,15	1,23	1,26	1,30	1,38	1,45	1,50
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,17	1,15	1,23	1,10	1,14	1,13	1,23
PGA 0,6 g	1,12	1,13	1,22	1,09	1,13	1,15	1,25
PGA 0,8 g	1,09	1,11	1,20	1,09	1,13	1,16	1,24
PGA 1,0 g	1,07	1,09	1,18	1,08	1,14	1,17	1,23

**Tabla C.18 Resultados Torre 90 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C –  
Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,05	1,02	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	1,01	1,01	1,02
PGA 0,6 g	1,11	1,06	1,02	<b>1,00</b>	1,04	1,04	1,05
PGA 0,8 g	1,15	1,09	1,04	1,02	1,06	1,07	1,09
PGA 1,0 g	1,18	1,13	1,07	1,05	1,09	1,11	1,12
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	1,08	1,04	1,05	1,08	1,10	1,11
PGA 0,6 g	1,19	1,13	1,08	1,09	1,13	1,16	1,17
PGA 0,8 g	1,21	1,17	1,12	1,13	1,18	1,22	1,24
PGA 1,0 g	1,22	1,19	1,15	1,16	1,23	1,26	1,29
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,25	1,18	1,12	1,13	1,14	1,18	1,22
PGA 0,6 g	1,26	1,22	1,16	1,18	1,22	1,27	1,31
PGA 0,8 g	1,25	1,25	1,20	1,22	1,28	1,35	1,39
PGA 1,0 g	1,25	1,25	1,23	1,25	1,32	1,39	1,45
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,12	1,08	1,17	1,05	1,10	1,09	1,19
PGA 0,6 g	1,12	1,08	1,15	1,03	1,06	1,08	1,18
PGA 0,8 g	1,14	1,10	1,15	1,04	1,07	1,10	1,18
PGA 1,0 g	1,15	1,12	1,15	1,05	1,11	1,12	1,19

# Anexo D

## Gráficos Resultados Torre 90 m

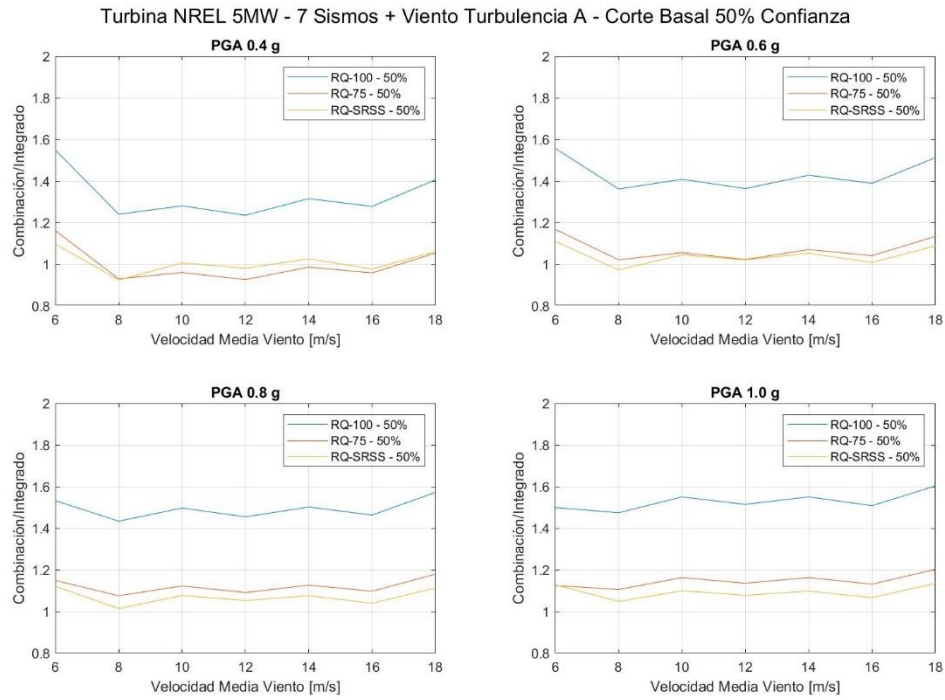


Figura D.1 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A

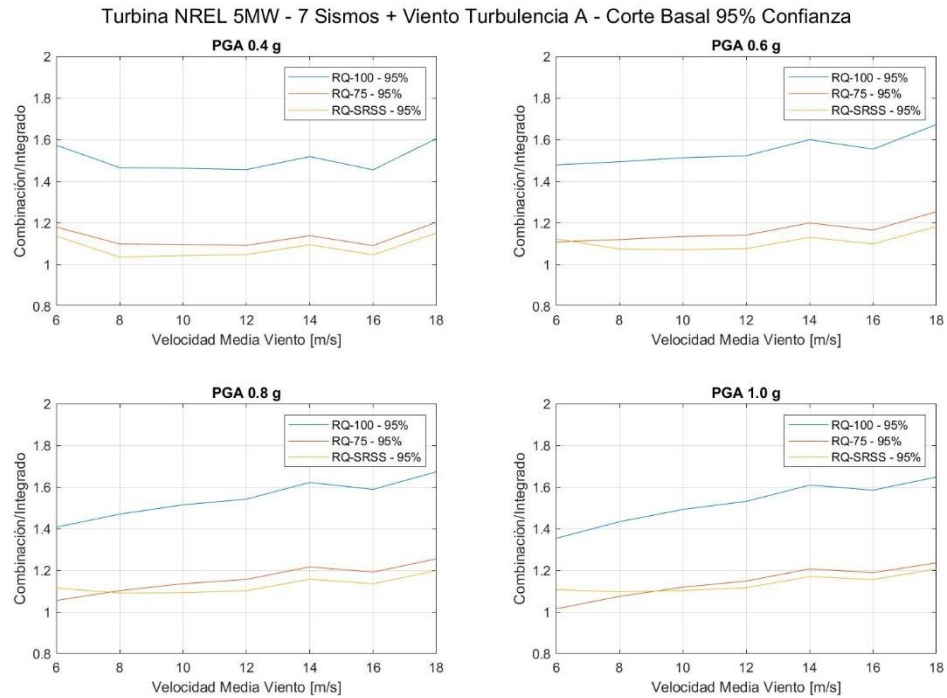
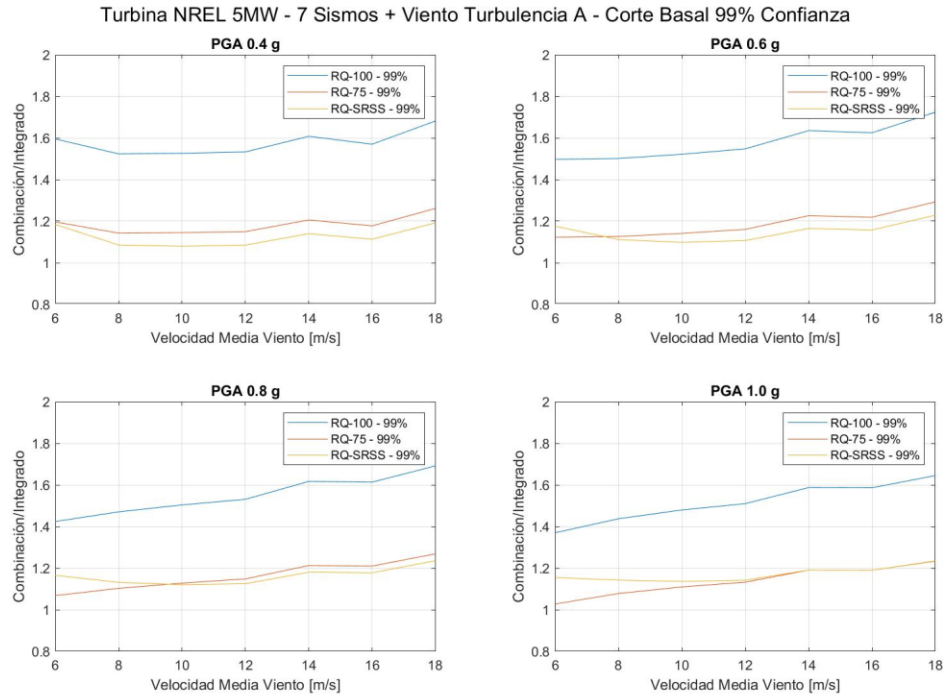
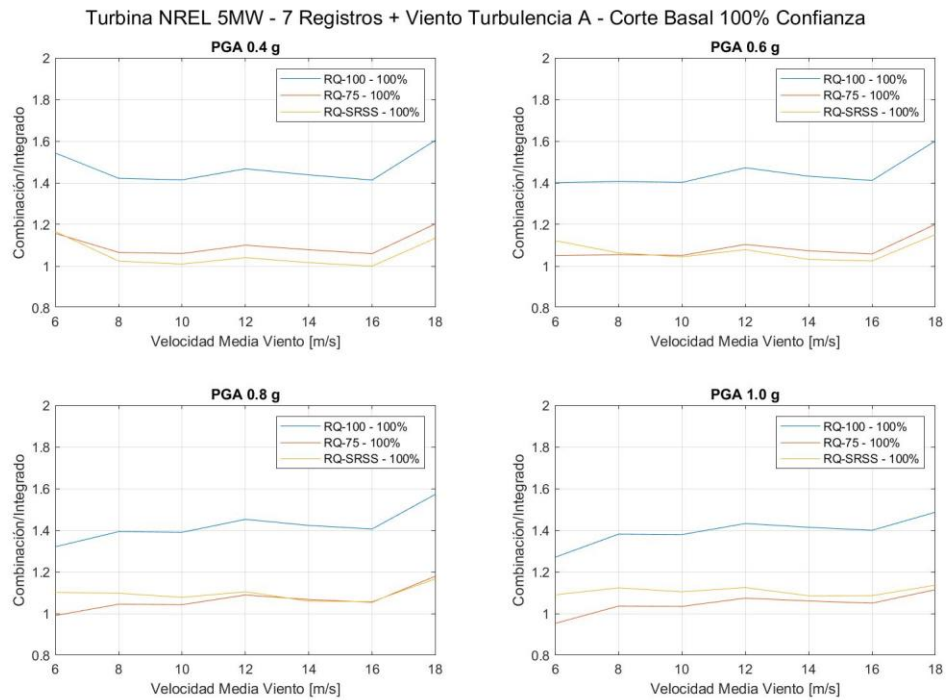


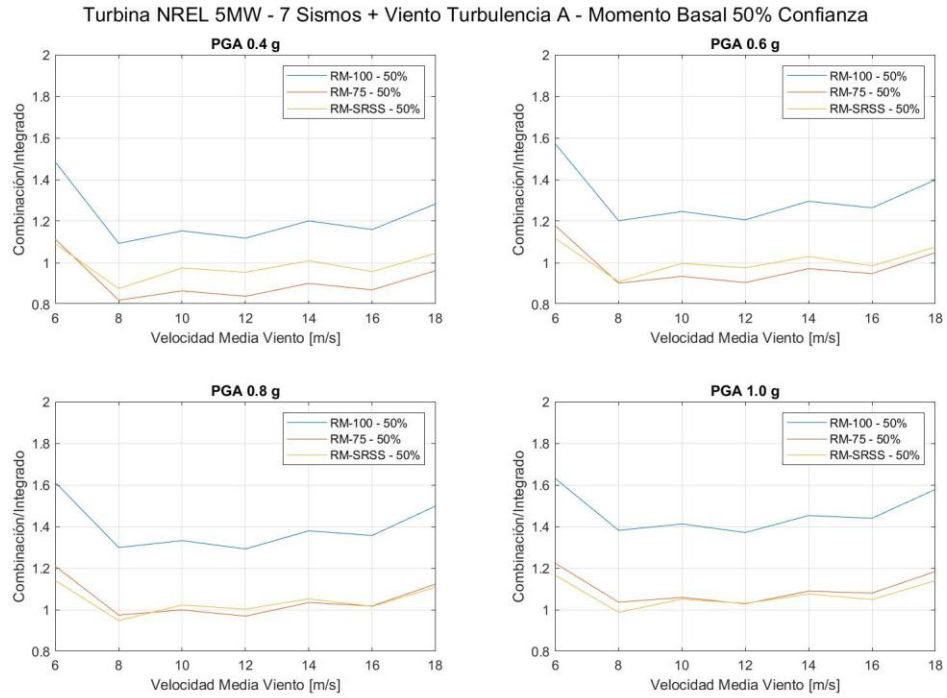
Figura D.2 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A



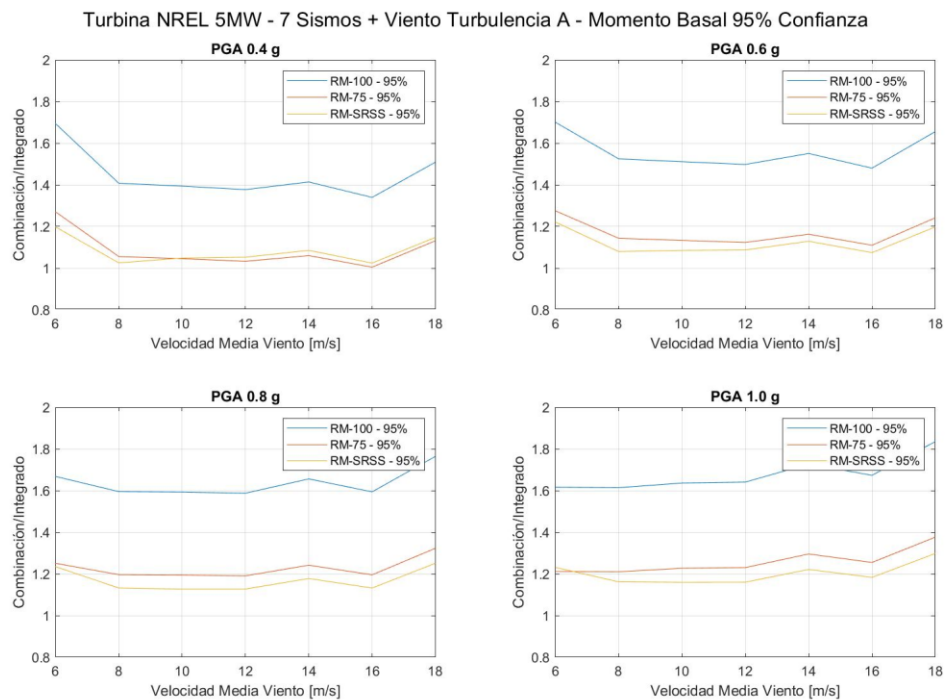
**Figura D.3 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



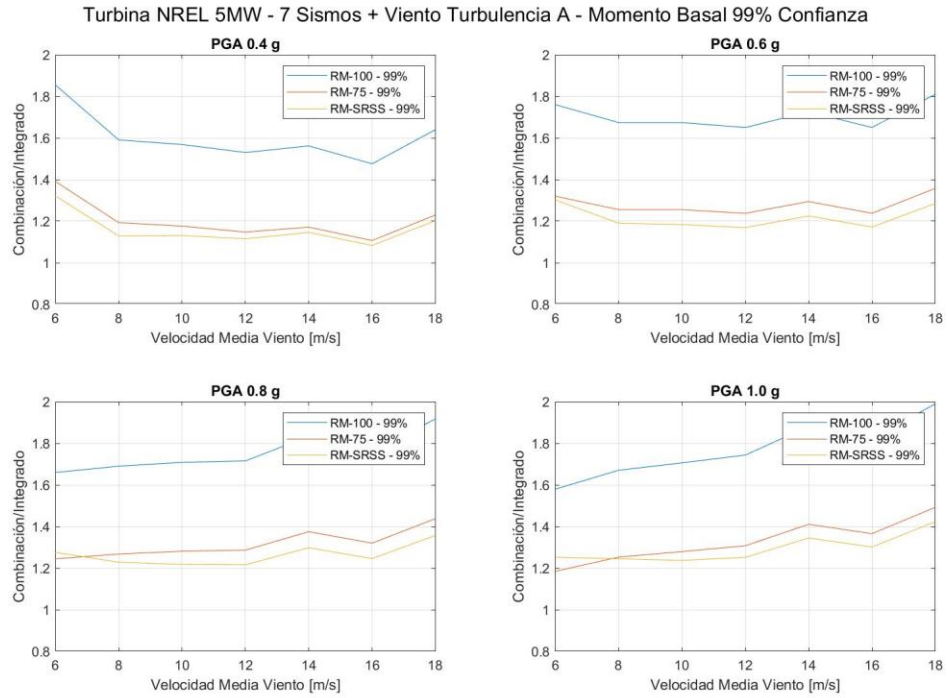
**Figura D.4 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**



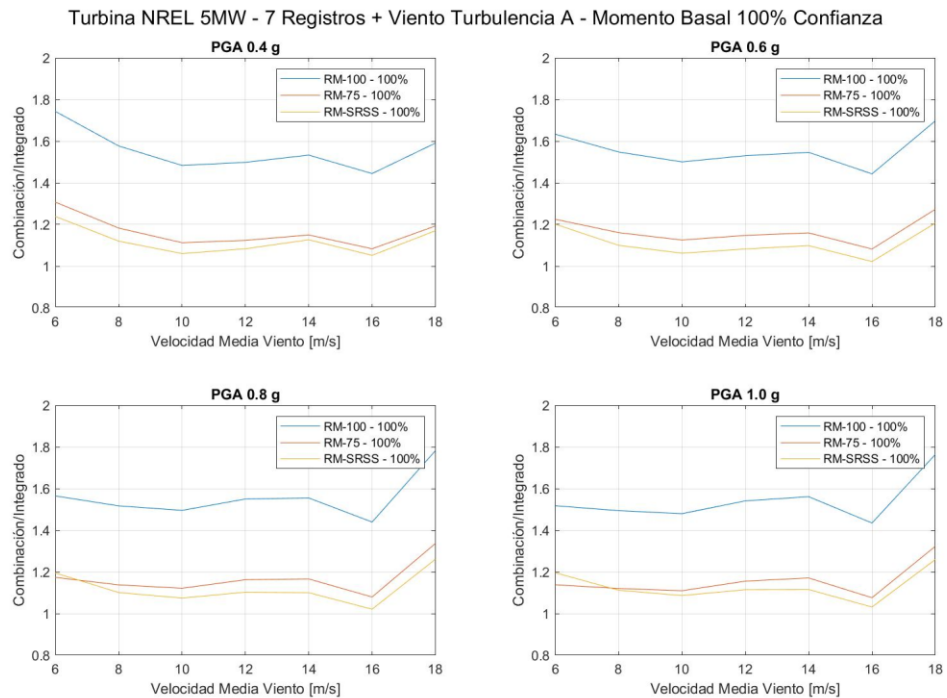
**Figura D.5 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A**



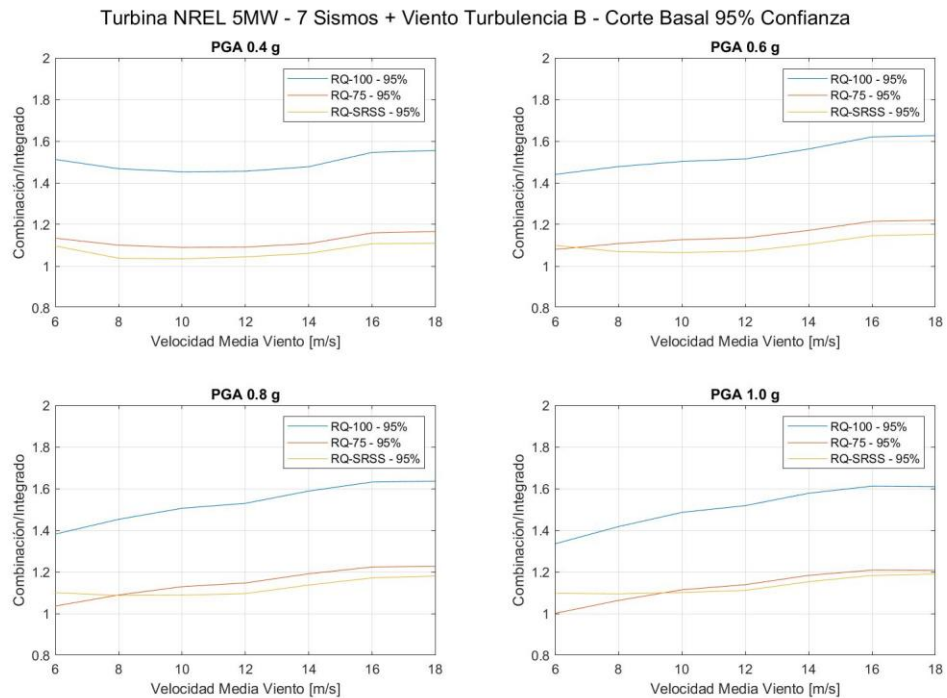
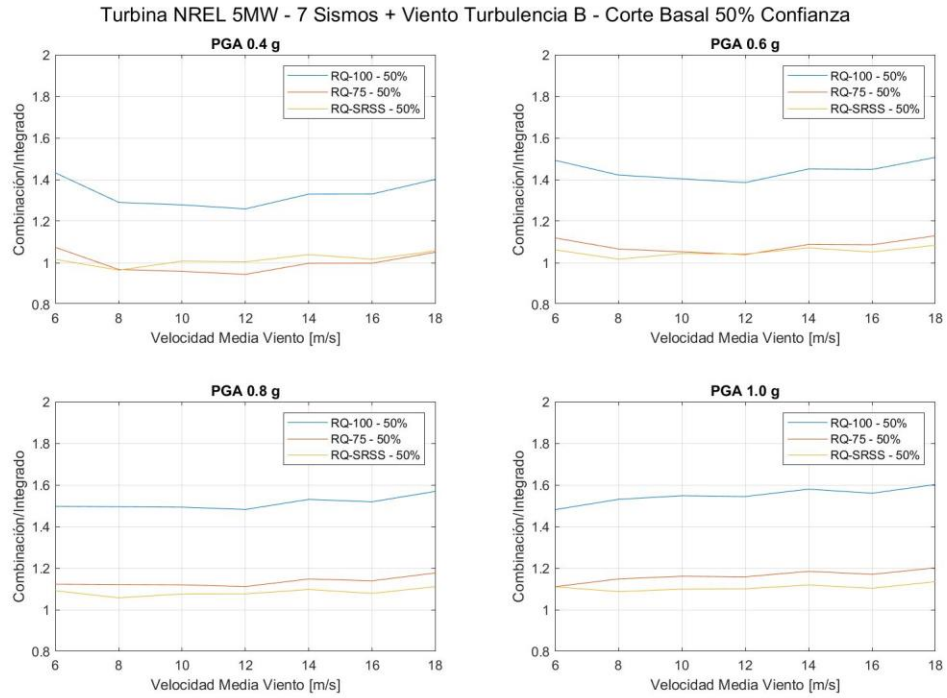
**Figura D.6 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A**



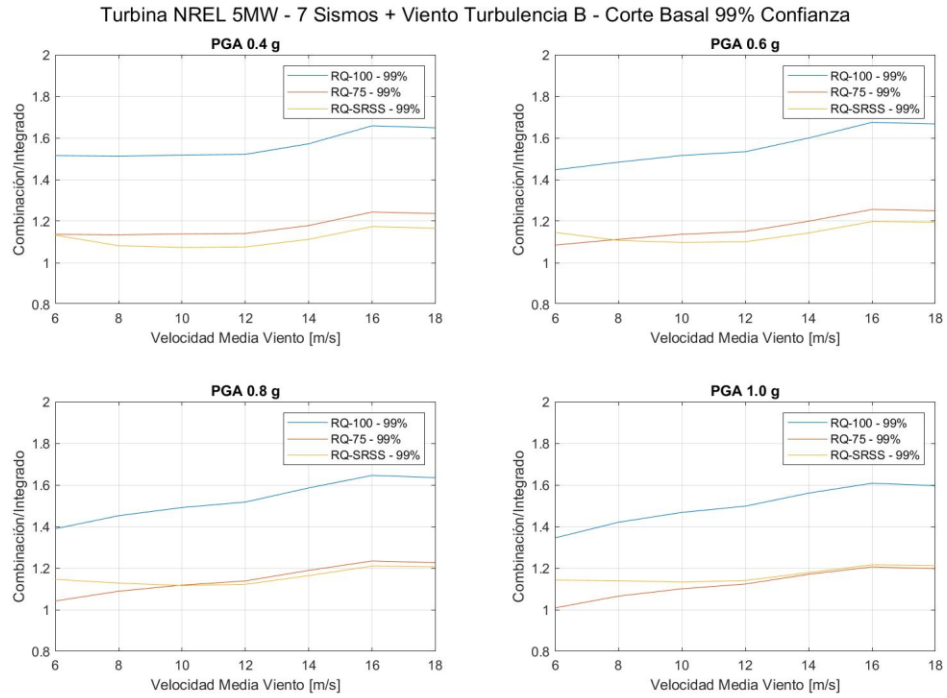
**Figura D.7 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



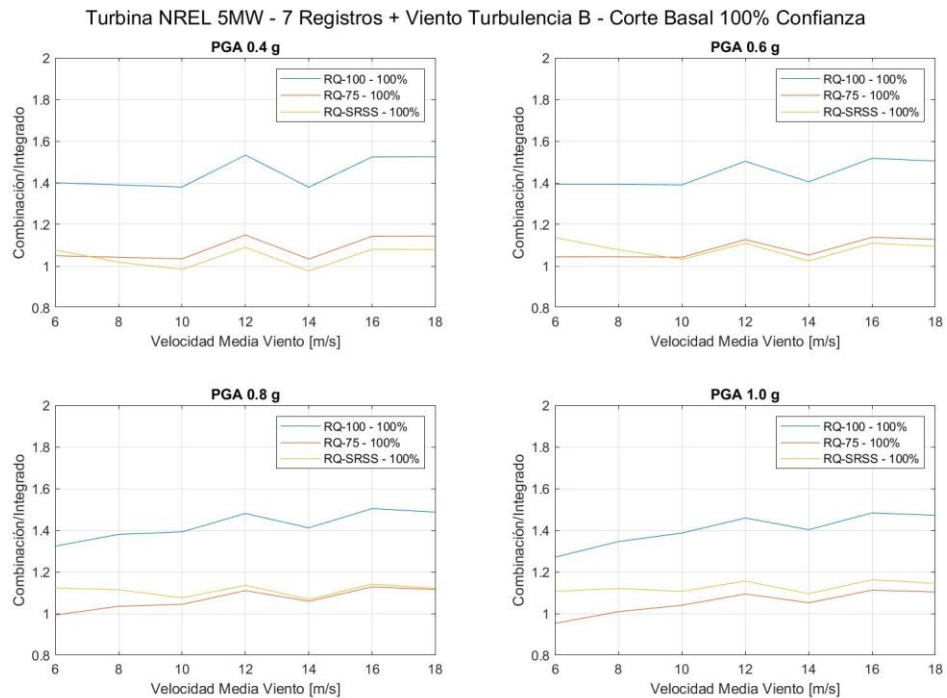
**Figura D.8 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**



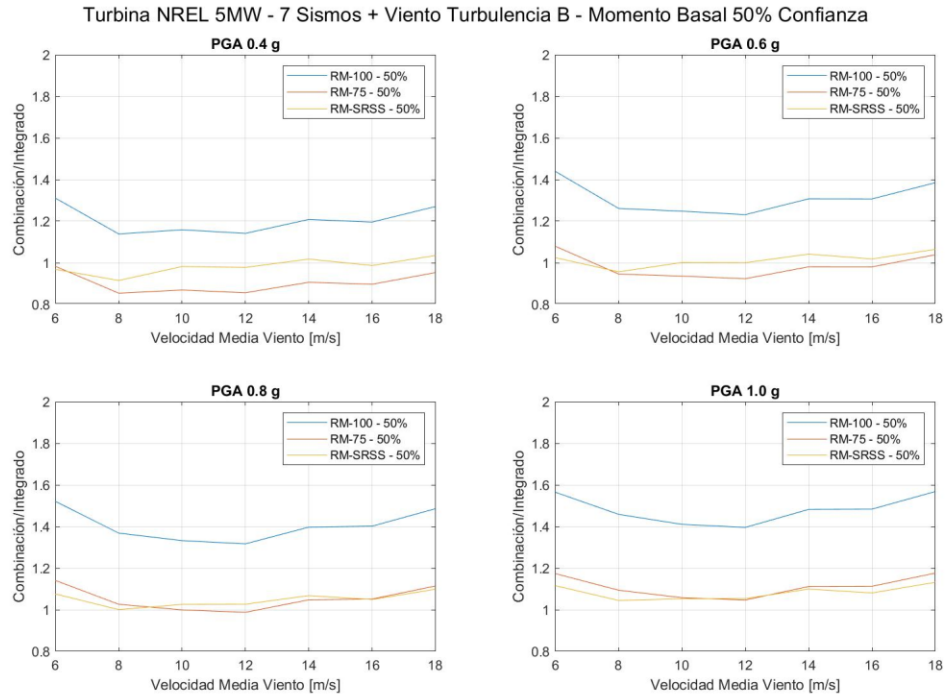




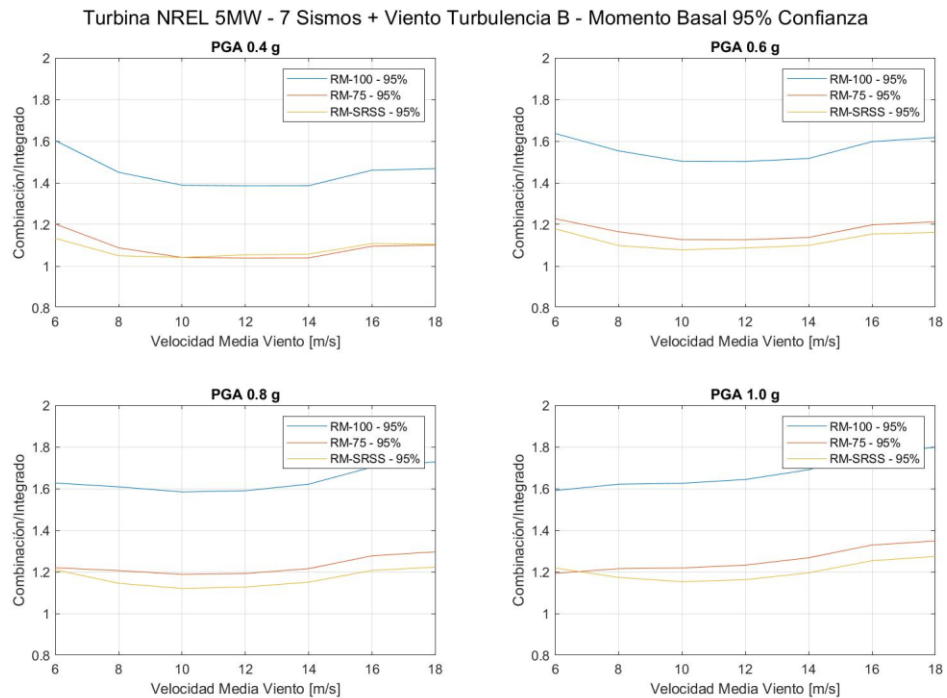
**Figura D.11 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel B**



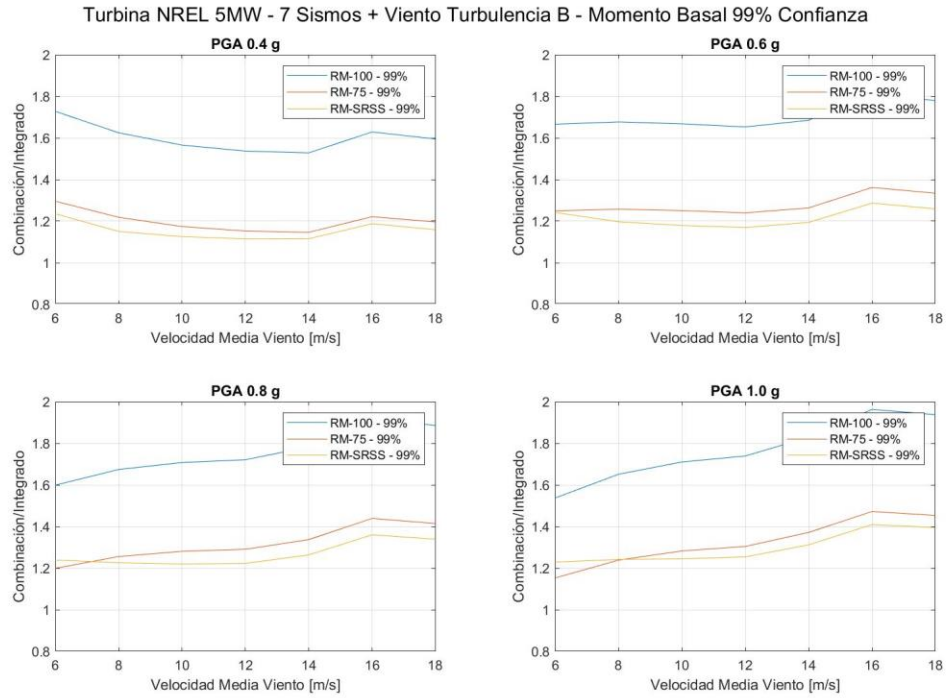
**Figura D.12 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel B**



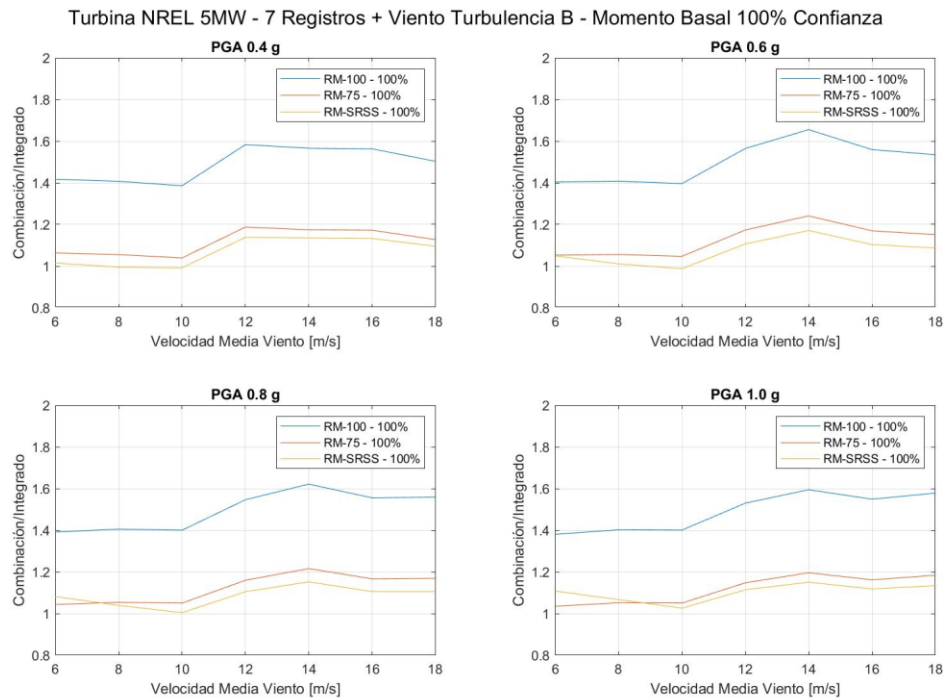
**Figura D.13 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel B**



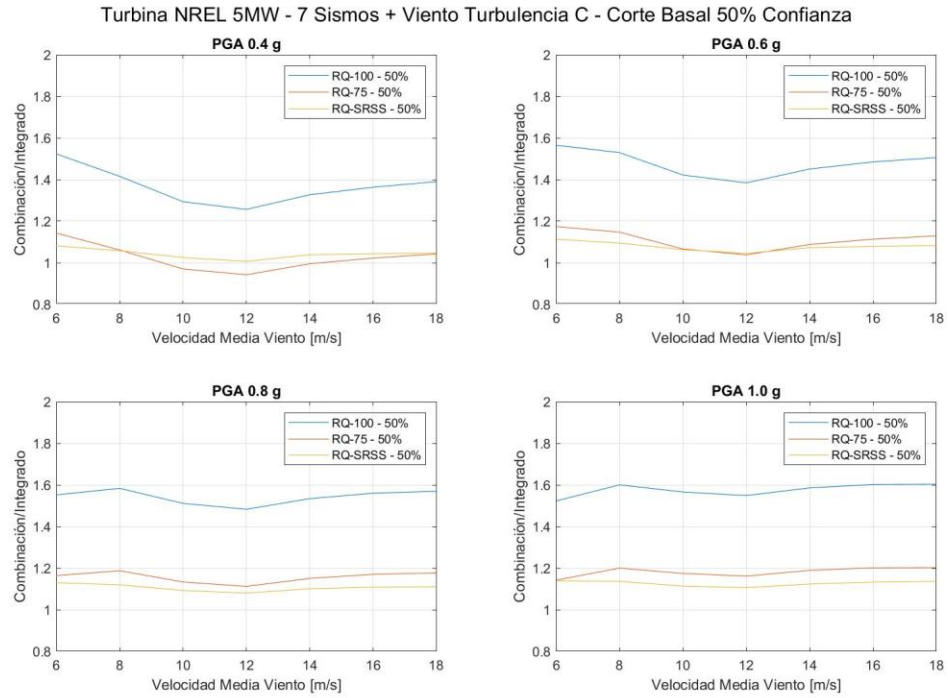
**Figura D.14 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel B**



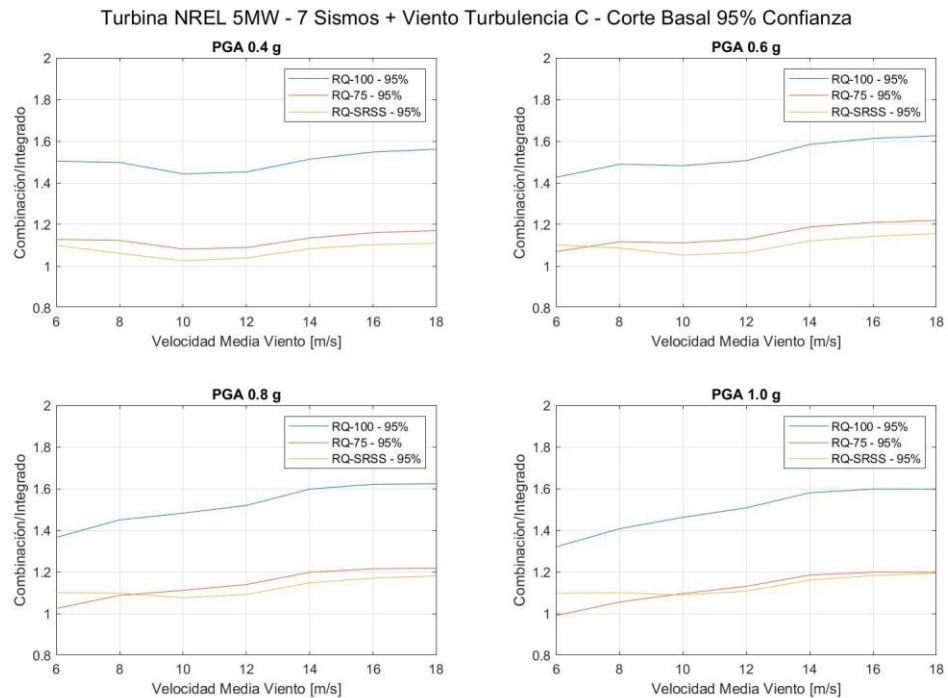
**Figura D.15 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel B**



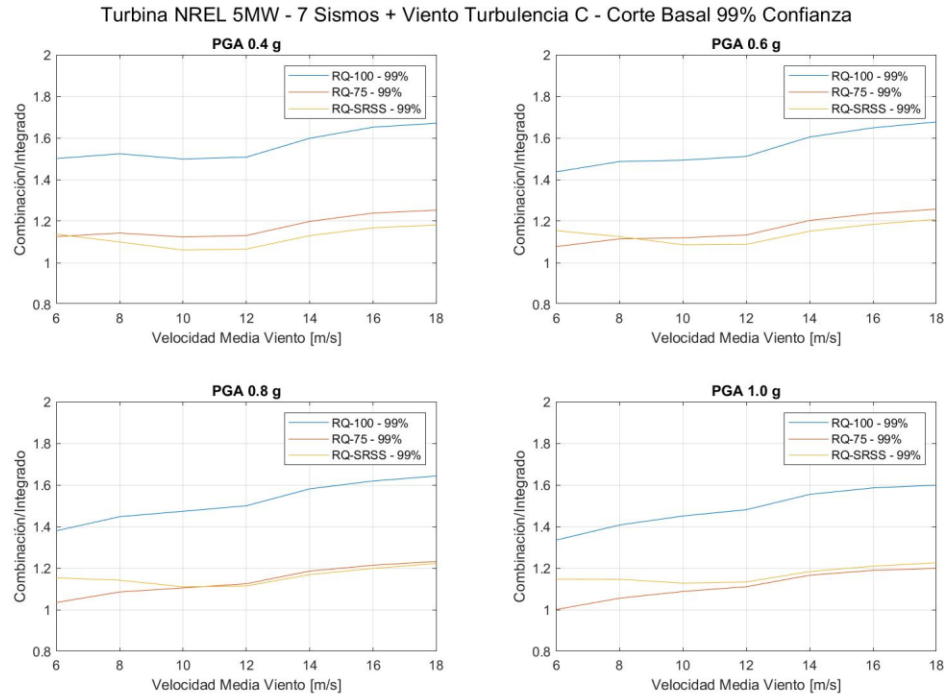
**Figura D.16 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel B**



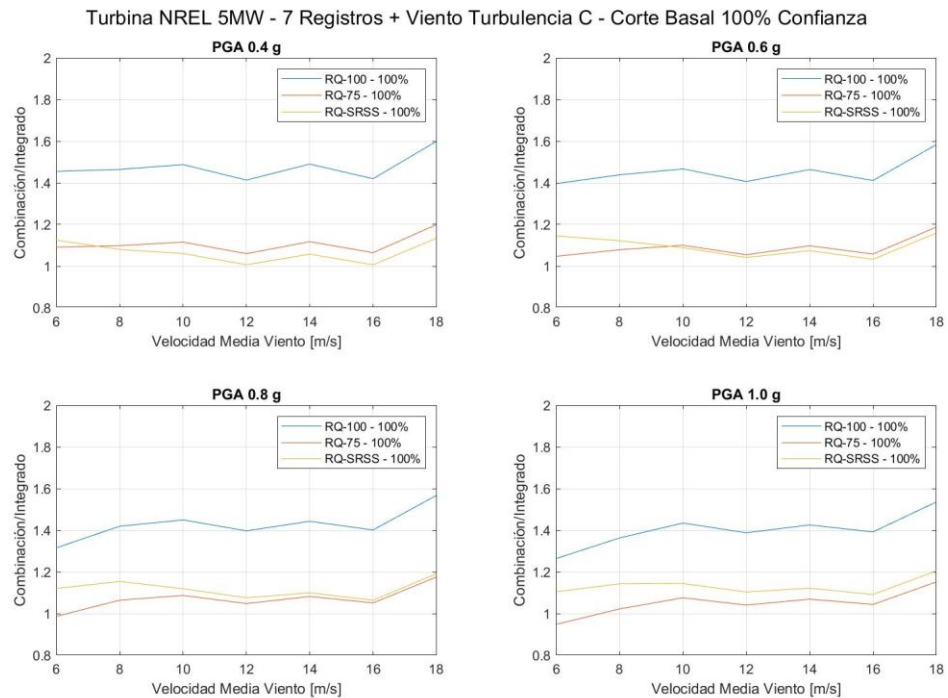
**Figura D.17 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**



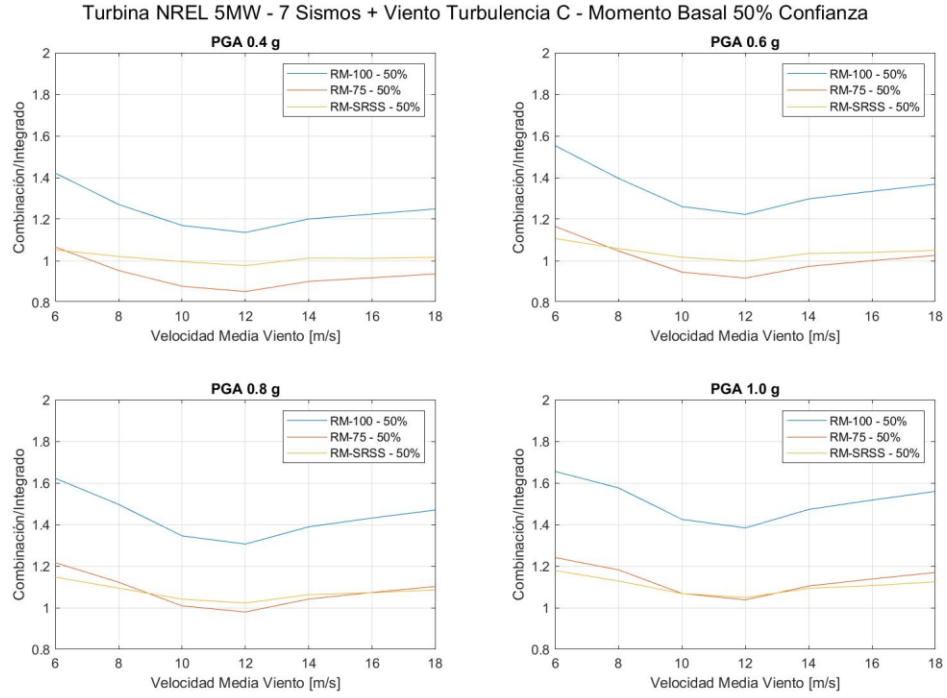
**Figura D.18 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**



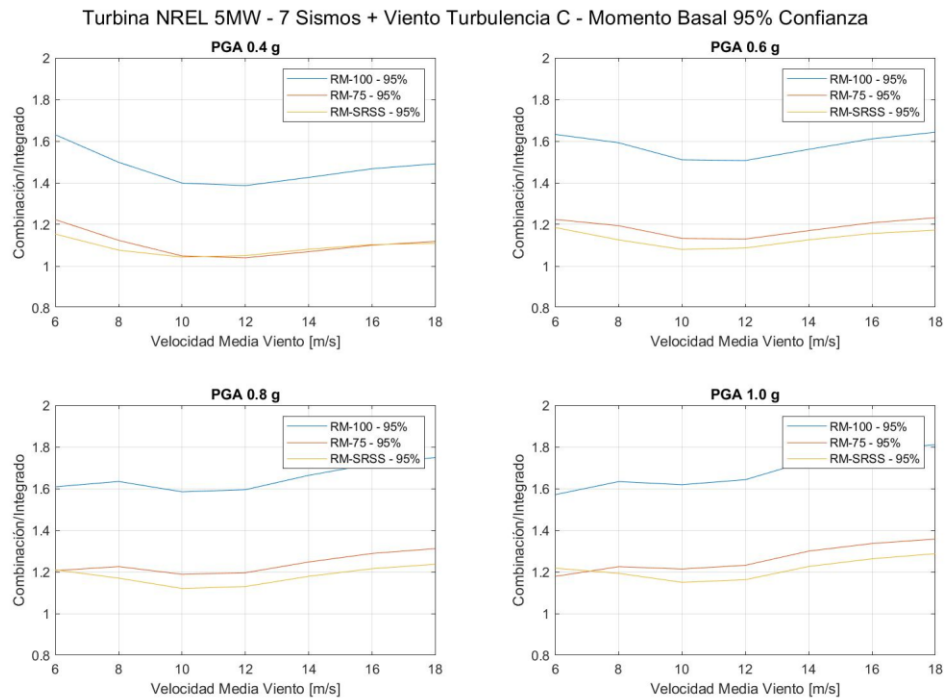
**Figura D.19 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel C**



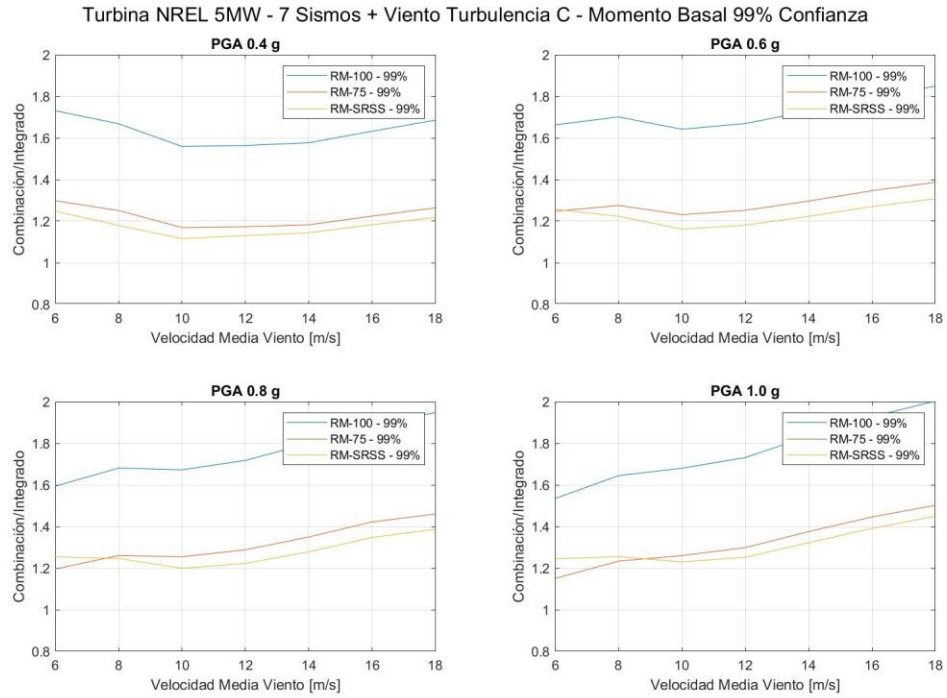
**Figura D.20 Resultados Torre 90 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel C**



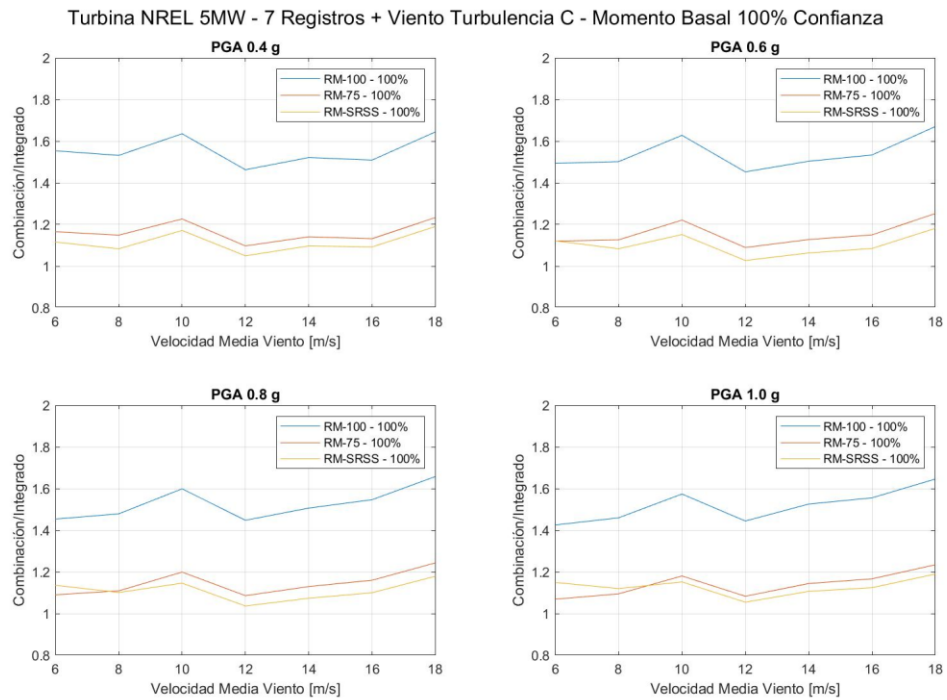
**Figura D.21 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura D.22 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura D.23 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura D.24 Resultados Torre 90 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel C**



# Anexo E

## Tablas Resultados Torre 120 m

Tabla E.1 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,53	1,16	1,22	1,18	1,23	1,18	1,33
PGA 0,6 g	1,58	1,28	1,32	1,28	1,33	1,28	1,43
PGA 0,8 g	1,58	1,36	1,41	1,37	1,41	1,35	1,50
PGA 1,0 g	1,56	1,42	1,48	1,43	1,47	1,41	1,55
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,74	1,49	1,48	1,44	1,47	1,45	1,62
PGA 0,6 g	1,68	1,58	1,59	1,56	1,61	1,60	1,75
PGA 0,8 g	1,62	1,61	1,64	1,63	1,69	1,68	1,82
PGA 1,0 g	1,56	1,59	1,65	1,66	1,73	1,72	1,84
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,56	1,46	1,49	1,46	1,52	1,49	1,59
PGA 0,6 g	1,47	1,47	1,51	1,52	1,61	1,61	1,71
PGA 0,8 g	1,41	1,45	1,50	1,54	1,62	1,65	1,74
PGA 1,0 g	1,36	1,42	1,48	1,53	1,61	1,64	1,73
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,28	1,27	1,25	1,33	1,38	1,29	1,49
PGA 0,6 g	1,23	1,24	1,28	1,29	1,34	1,29	1,47
PGA 0,8 g	1,20	1,22	1,26	1,27	1,31	1,27	1,42
PGA 1,0 g	1,18	1,21	1,24	1,25	1,29	1,26	1,39

Tabla E.2 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R75

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	<b>0,87</b>	<b>0,91</b>	<b>0,88</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>	<b>1,00</b>
PGA 0,6 g	1,18	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	1,08
PGA 0,8 g	1,18	1,02	1,06	1,03	1,06	1,01	1,13
PGA 1,0 g	1,17	1,07	1,11	1,08	1,10	1,06	1,16
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,30	1,12	1,11	1,08	1,10	1,09	1,21
PGA 0,6 g	1,26	1,19	1,19	1,17	1,21	1,20	1,31
PGA 0,8 g	1,22	1,20	1,23	1,22	1,27	1,26	1,36
PGA 1,0 g	1,17	1,19	1,24	1,24	1,29	1,29	1,38
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,17	1,10	1,12	1,09	1,14	1,12	1,19
PGA 0,6 g	1,11	1,10	1,13	1,14	1,20	1,21	1,28
PGA 0,8 g	1,06	1,08	1,12	1,15	1,22	1,23	1,30
PGA 1,0 g	1,02	1,07	1,11	1,15	1,21	1,23	1,30
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	<b>0,94</b>	<b>1,00</b>	1,03	<b>0,97</b>	1,12
PGA 0,6 g	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	1,00	<b>0,97</b>	1,10
PGA 0,8 g	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>	1,07
PGA 1,0 g	<b>0,89</b>	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	<b>0,94</b>	1,04



**Tabla E.3 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	1,01	<b>0,94</b>	1,06
PGA 0,6 g	1,12	<b>0,94</b>	1,01	<b>1,00</b>	1,02	<b>0,96</b>	1,08
PGA 0,8 g	1,13	<b>0,97</b>	1,04	1,02	1,04	<b>0,98</b>	1,09
PGA 1,0 g	1,14	1,00	1,06	1,04	1,06	1,01	1,10
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,26	1,05	1,06	1,04	1,07	1,06	1,17
PGA 0,6 g	1,28	1,14	1,12	1,10	1,14	1,13	1,24
PGA 0,8 g	1,29	1,19	1,18	1,16	1,20	1,19	1,29
PGA 1,0 g	1,28	1,21	1,21	1,20	1,24	1,24	1,32
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	1,03	1,06	1,04	1,09	1,07	1,14
PGA 0,6 g	1,14	1,07	1,08	1,08	1,14	1,14	1,21
PGA 0,8 g	1,14	1,09	1,09	1,11	1,16	1,18	1,24
PGA 1,0 g	1,13	1,11	1,11	1,13	1,18	1,20	1,26
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,88</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	1,08
PGA 0,6 g	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	1,04
PGA 0,8 g	<b>0,97</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	<b>0,91</b>	1,02
PGA 1,0 g	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	1,01

**Tabla E.4 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,36	1,21	1,22	1,21	1,23	1,26	1,27
PGA 0,6 g	1,46	1,33	1,33	1,32	1,33	1,36	1,37
PGA 0,8 g	1,49	1,42	1,41	1,40	1,41	1,43	1,45
PGA 1,0 g	1,50	1,47	1,48	1,47	1,47	1,49	1,50
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,64	1,52	1,47	1,47	1,46	1,56	1,56
PGA 0,6 g	1,62	1,60	1,58	1,58	1,60	1,70	1,71
PGA 0,8 g	1,57	1,60	1,63	1,65	1,68	1,77	1,78
PGA 1,0 g	1,53	1,58	1,64	1,67	1,71	1,80	1,80
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,48	1,46	1,47	1,48	1,50	1,60	1,60
PGA 0,6 g	1,43	1,45	1,49	1,52	1,57	1,70	1,69
PGA 0,8 g	1,38	1,43	1,48	1,52	1,59	1,71	1,71
PGA 1,0 g	1,34	1,40	1,46	1,51	1,58	1,69	1,68
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,28	1,23	1,30	1,30	1,27	1,24	1,46
PGA 0,6 g	1,24	1,21	1,29	1,28	1,25	1,26	1,41
PGA 0,8 g	1,21	1,19	1,27	1,26	1,23	1,27	1,37
PGA 1,0 g	1,19	1,18	1,25	1,24	1,21	1,27	1,34

**Tabla E.5 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,02	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>
PGA 0,6 g	1,09	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	1,02	1,03
PGA 0,8 g	1,12	1,06	1,06	1,05	1,06	1,08	1,09
PGA 1,0 g	1,12	1,10	1,11	1,10	1,10	1,12	1,13
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,23	1,14	1,10	1,10	1,09	1,17	1,17
PGA 0,6 g	1,21	1,20	1,19	1,19	1,20	1,28	1,28
PGA 0,8 g	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,33	1,33
PGA 1,0 g	1,15	1,19	1,23	1,25	1,28	1,35	1,35
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	1,10	1,10	1,11	1,12	1,20	1,20
PGA 0,6 g	1,07	1,09	1,12	1,14	1,18	1,27	1,27
PGA 0,8 g	1,03	1,07	1,11	1,14	1,19	1,28	1,28
PGA 1,0 g	1,00	1,05	1,10	1,13	1,18	1,27	1,26
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,96</b>	<b>0,92</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	1,10
PGA 0,6 g	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	1,06
PGA 0,8 g	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	1,03
PGA 1,0 g	<b>0,89</b>	<b>0,88</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	1,00

**Tabla E.6 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	1,00	1,00	1,01	1,01
PGA 0,6 g	1,03	<b>0,97</b>	1,02	1,03	1,02	1,03	1,02
PGA 0,8 g	1,06	1,01	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04
PGA 1,0 g	1,09	1,04	1,06	1,07	1,06	1,06	1,07
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,19	1,08	1,05	1,06	1,06	1,13	1,13
PGA 0,6 g	1,24	1,15	1,12	1,12	1,13	1,20	1,21
PGA 0,8 g	1,25	1,20	1,18	1,18	1,19	1,26	1,27
PGA 1,0 g	1,26	1,22	1,21	1,21	1,24	1,30	1,31
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,04	1,04	1,05	1,07	1,14	1,14
PGA 0,6 g	1,12	1,06	1,06	1,08	1,11	1,20	1,20
PGA 0,8 g	1,12	1,09	1,08	1,10	1,14	1,23	1,23
PGA 1,0 g	1,12	1,11	1,10	1,12	1,16	1,24	1,24
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,95</b>	<b>0,88</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	1,05
PGA 0,6 g	<b>0,98</b>	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>	<b>0,89</b>	<b>1,00</b>
PGA 0,8 g	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>
PGA 1,0 g	1,01	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>

**Tabla E.7 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,45	1,32	1,23	1,19	1,26	1,27	1,31
PGA 0,6 g	1,54	1,44	1,34	1,30	1,36	1,37	1,41
PGA 0,8 g	1,55	1,52	1,43	1,39	1,44	1,45	1,49
PGA 1,0 g	1,54	1,56	1,50	1,46	1,51	1,50	1,53
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,65	1,59	1,48	1,48	1,52	1,56	1,61
PGA 0,6 g	1,61	1,63	1,58	1,58	1,66	1,69	1,74
PGA 0,8 g	1,56	1,62	1,62	1,64	1,72	1,77	1,80
PGA 1,0 g	1,52	1,58	1,62	1,66	1,75	1,78	1,81
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,47	1,48	1,46	1,49	1,53	1,59	1,66
PGA 0,6 g	1,41	1,46	1,47	1,52	1,60	1,67	1,72
PGA 0,8 g	1,36	1,43	1,45	1,52	1,60	1,68	1,71
PGA 1,0 g	1,32	1,40	1,44	1,50	1,59	1,66	1,68
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,19	1,24	1,25	1,27	1,25	1,43	1,39
PGA 0,6 g	1,17	1,21	1,24	1,25	1,26	1,39	1,36
PGA 0,8 g	1,15	1,19	1,22	1,23	1,26	1,35	1,34
PGA 1,0 g	1,14	1,18	1,21	1,22	1,25	1,32	1,32

**Tabla E.8 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>
PGA 0,6 g	1,15	1,08	1,00	<b>0,98</b>	1,02	1,03	1,06
PGA 0,8 g	1,16	1,14	1,07	1,04	1,08	1,09	1,11
PGA 1,0 g	1,16	1,17	1,12	1,10	1,13	1,13	1,15
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,24	1,19	1,11	1,11	1,14	1,17	1,20
PGA 0,6 g	1,21	1,22	1,18	1,19	1,24	1,27	1,31
PGA 0,8 g	1,17	1,21	1,22	1,23	1,29	1,33	1,35
PGA 1,0 g	1,14	1,19	1,22	1,25	1,31	1,34	1,35
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,11	1,10	1,12	1,15	1,20	1,24
PGA 0,6 g	1,06	1,09	1,10	1,14	1,20	1,25	1,29
PGA 0,8 g	1,02	1,07	1,09	1,14	1,20	1,26	1,28
PGA 1,0 g	<b>0,99</b>	1,05	1,08	1,13	1,19	1,24	1,26
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,89</b>	<b>0,93</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,94</b>	1,07	1,04
PGA 0,6 g	<b>0,87</b>	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	1,04	1,02
PGA 0,8 g	<b>0,86</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	1,01	1,00
PGA 1,0 g	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>

**Tabla E.9 Resultados Torre 120 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,05	1,02	1,01	<b>0,99</b>	1,02	1,01	1,03
PGA 0,6 g	1,09	1,06	1,03	1,02	1,05	1,03	1,05
PGA 0,8 g	1,11	1,09	1,06	1,05	1,07	1,05	1,07
PGA 1,0 g	1,12	1,10	1,08	1,07	1,09	1,07	1,09
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,21	1,12	1,05	1,06	1,10	1,12	1,15
PGA 0,6 g	1,24	1,19	1,12	1,12	1,17	1,20	1,23
PGA 0,8 g	1,26	1,22	1,17	1,17	1,23	1,26	1,29
PGA 1,0 g	1,26	1,23	1,21	1,21	1,27	1,29	1,32
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,06	1,03	1,06	1,09	1,14	1,18
PGA 0,6 g	1,12	1,08	1,05	1,08	1,13	1,18	1,22
PGA 0,8 g	1,12	1,11	1,08	1,10	1,16	1,21	1,24
PGA 1,0 g	1,12	1,12	1,10	1,12	1,18	1,22	1,24
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	1,02	<b>0,99</b>
PGA 0,6 g	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>
PGA 0,8 g	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>
PGA 1,0 g	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>

**Tabla E.10 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,28	<b>0,94</b>	1,04	1,00	1,06	1,01	1,12
PGA 0,6 g	1,35	<b>0,99</b>	1,07	1,03	1,09	1,04	1,16
PGA 0,8 g	1,42	1,03	1,11	1,07	1,13	1,08	1,21
PGA 1,0 g	1,48	1,07	1,14	1,10	1,16	1,11	1,25
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,49	1,16	1,16	1,13	1,14	1,13	1,28
PGA 0,6 g	1,61	1,25	1,24	1,20	1,21	1,20	1,36
PGA 0,8 g	1,70	1,33	1,30	1,27	1,28	1,26	1,43
PGA 1,0 g	1,75	1,39	1,36	1,32	1,34	1,32	1,49
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,58	1,17	1,20	1,17	1,19	1,15	1,23
PGA 0,6 g	1,66	1,27	1,29	1,25	1,27	1,23	1,32
PGA 0,8 g	1,68	1,34	1,36	1,32	1,35	1,30	1,39
PGA 1,0 g	1,67	1,40	1,42	1,38	1,41	1,36	1,46
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,45	1,20	1,14	1,14	1,32	1,19	1,27
PGA 0,6 g	1,39	1,23	1,16	1,19	1,32	1,21	1,32
PGA 0,8 g	1,34	1,26	1,17	1,24	1,32	1,22	1,36
PGA 1,0 g	1,31	1,28	1,18	1,28	1,33	1,23	1,38

**Tabla E.11 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,96	0,71	0,78	0,75	0,79	0,76	0,84
PGA 0,6 g	1,01	0,74	0,80	0,78	0,82	0,78	0,87
PGA 0,8 g	1,07	0,77	0,83	0,80	0,85	0,81	0,91
PGA 1,0 g	1,11	0,80	0,86	0,83	0,87	0,83	0,94
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	0,87	0,87	0,85	0,86	0,85	0,96
PGA 0,6 g	1,21	0,94	0,93	0,90	0,91	0,90	1,02
PGA 0,8 g	1,27	0,99	0,98	0,95	0,96	0,94	1,07
PGA 1,0 g	1,31	1,04	1,02	0,99	1,00	0,99	1,11
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,18	0,88	0,90	0,88	0,89	0,87	0,93
PGA 0,6 g	1,24	0,95	0,97	0,94	0,96	0,93	0,99
PGA 0,8 g	1,26	1,01	1,02	0,99	1,01	0,98	1,04
PGA 1,0 g	1,25	1,05	1,06	1,04	1,06	1,02	1,09
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	0,90	0,85	0,85	0,99	0,90	0,95
PGA 0,6 g	1,04	0,92	0,87	0,89	0,99	0,91	0,99
PGA 0,8 g	1,01	0,94	0,88	0,93	0,99	0,92	1,02
PGA 1,0 g	0,98	0,96	0,88	0,96	0,99	0,92	1,03

**Tabla E.12 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	0,86	0,97	0,94	0,99	0,93	1,03
PGA 0,6 g	1,10	0,86	0,97	0,95	0,99	0,94	1,04
PGA 0,8 g	1,10	0,87	0,98	0,95	1,00	0,94	1,05
PGA 1,0 g	1,11	0,88	0,98	0,96	1,00	0,95	1,05
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	0,96	0,99	0,98	1,00	0,98	1,11
PGA 0,6 g	1,17	0,97	1,00	0,99	1,01	0,99	1,12
PGA 0,8 g	1,21	0,99	1,01	1,00	1,02	1,00	1,13
PGA 1,0 g	1,24	1,01	1,02	1,01	1,03	1,02	1,14
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,18	0,94	1,00	0,99	1,02	0,99	1,06
PGA 0,6 g	1,19	0,96	1,01	1,01	1,03	1,00	1,07
PGA 0,8 g	1,19	0,98	1,03	1,02	1,05	1,01	1,08
PGA 1,0 g	1,19	1,00	1,04	1,03	1,06	1,03	1,10
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	0,98	0,94	0,97	1,13	1,03	1,10
PGA 0,6 g	1,01	0,95	0,91	0,97	1,08	0,99	1,09
PGA 0,8 g	0,96	0,93	0,88	0,97	1,03	0,96	1,08
PGA 1,0 g	0,92	0,92	0,86	0,97	1,01	0,94	1,06

**Tabla E.13 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	<b>0,97</b>	1,05	1,03	1,05	1,07	1,08
PGA 0,6 g	1,13	1,02	1,08	1,06	1,08	1,11	1,12
PGA 0,8 g	1,20	1,06	1,11	1,09	1,12	1,15	1,16
PGA 1,0 g	1,26	1,11	1,15	1,13	1,15	1,18	1,20
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,35	1,21	1,16	1,17	1,12	1,21	1,20
PGA 0,6 g	1,47	1,29	1,23	1,24	1,19	1,29	1,28
PGA 0,8 g	1,56	1,36	1,30	1,31	1,26	1,36	1,35
PGA 1,0 g	1,62	1,42	1,36	1,36	1,32	1,42	1,42
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,44	1,29	1,20	1,21	1,18	1,22	1,24
PGA 0,6 g	1,53	1,38	1,29	1,28	1,26	1,30	1,32
PGA 0,8 g	1,56	1,44	1,35	1,34	1,33	1,38	1,39
PGA 1,0 g	1,56	1,47	1,40	1,39	1,39	1,45	1,46
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,33	1,31	1,21	1,15	1,28	1,14	1,38
PGA 0,6 g	1,29	1,31	1,23	1,18	1,28	1,13	1,41
PGA 0,8 g	1,27	1,29	1,26	1,20	1,29	1,13	1,42
PGA 1,0 g	1,24	1,27	1,28	1,22	1,28	1,12	1,42

**Tabla E.14 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,79</b>	<b>0,73</b>	<b>0,79</b>	<b>0,77</b>	<b>0,79</b>	<b>0,81</b>	<b>0,81</b>
PGA 0,6 g	<b>0,85</b>	<b>0,76</b>	<b>0,81</b>	<b>0,80</b>	<b>0,81</b>	<b>0,83</b>	<b>0,84</b>
PGA 0,8 g	<b>0,90</b>	<b>0,80</b>	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>	<b>0,87</b>
PGA 1,0 g	<b>0,94</b>	<b>0,83</b>	<b>0,86</b>	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,90</b>
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,01	<b>0,90</b>	<b>0,87</b>	<b>0,88</b>	<b>0,84</b>	<b>0,91</b>	<b>0,90</b>
PGA 0,6 g	1,11	<b>0,97</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,89</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>
PGA 0,8 g	1,17	1,02	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	1,02	1,01
PGA 1,0 g	1,22	1,06	1,02	1,02	<b>0,99</b>	1,06	1,06
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	<b>0,97</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,88</b>	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>
PGA 0,6 g	1,15	1,04	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>
PGA 0,8 g	1,17	1,08	1,01	1,01	<b>1,00</b>	1,04	1,05
PGA 1,0 g	1,17	1,10	1,05	1,04	1,04	1,09	1,10
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	<b>0,96</b>	<b>0,86</b>	1,03
PGA 0,6 g	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>	<b>0,96</b>	<b>0,85</b>	1,05
PGA 0,8 g	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	<b>0,96</b>	<b>0,84</b>	1,07
PGA 1,0 g	<b>0,93</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>0,84</b>	1,06

**Tabla E.15 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,90</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>
PGA 0,6 g	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
PGA 0,8 g	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	1,00	<b>1,00</b>
PGA 1,0 g	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	1,01	1,00
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,03	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	1,01	<b>0,97</b>	1,05	1,03
PGA 0,6 g	1,07	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	1,02	<b>0,98</b>	1,06	1,05
PGA 0,8 g	1,11	1,00	1,00	1,03	<b>1,00</b>	1,08	1,06
PGA 1,0 g	1,15	1,02	1,02	1,04	1,01	1,09	1,08
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	1,02	<b>1,00</b>	1,02	<b>1,00</b>	1,04	1,05
PGA 0,6 g	1,09	1,04	1,01	1,02	1,01	1,05	1,06
PGA 0,8 g	1,10	1,04	1,02	1,02	1,03	1,07	1,08
PGA 1,0 g	1,11	1,04	1,03	1,03	1,04	1,09	1,09
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,99</b>	1,04	1,01	<b>0,96</b>	1,09	<b>0,98</b>	1,19
PGA 0,6 g	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	1,04	<b>0,92</b>	1,15
PGA 0,8 g	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,91</b>	<b>1,00</b>	<b>0,88</b>	1,12
PGA 1,0 g	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>0,96</b>	<b>0,84</b>	1,08

**Tabla E.16 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C –  
Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	1,09	1,06	1,02	1,06	1,06	1,09
PGA 0,6 g	1,21	1,13	1,09	1,05	1,10	1,10	1,13
PGA 0,8 g	1,29	1,18	1,12	1,08	1,14	1,14	1,17
PGA 1,0 g	1,36	1,23	1,16	1,11	1,17	1,18	1,21
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,43	1,28	1,18	1,19	1,20	1,20	1,23
PGA 0,6 g	1,54	1,38	1,25	1,25	1,27	1,28	1,32
PGA 0,8 g	1,61	1,45	1,32	1,31	1,34	1,35	1,39
PGA 1,0 g	1,65	1,51	1,38	1,37	1,39	1,41	1,46
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,49	1,35	1,21	1,20	1,21	1,24	1,29
PGA 0,6 g	1,55	1,44	1,31	1,29	1,30	1,32	1,39
PGA 0,8 g	1,56	1,48	1,38	1,36	1,36	1,40	1,47
PGA 1,0 g	1,55	1,51	1,43	1,41	1,42	1,47	1,54
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,28	1,32	1,27	1,21	1,20	1,36	1,45
PGA 0,6 g	1,25	1,29	1,29	1,23	1,21	1,36	1,45
PGA 0,8 g	1,23	1,27	1,27	1,23	1,21	1,36	1,43
PGA 1,0 g	1,21	1,25	1,26	1,23	1,21	1,36	1,42

**Tabla E.17 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,85	0,81	0,79	0,76	0,80	0,79	0,81
PGA 0,6 g	0,91	0,85	0,82	0,79	0,83	0,82	0,85
PGA 0,8 g	0,97	0,89	0,84	0,81	0,85	0,85	0,88
PGA 1,0 g	1,02	0,92	0,87	0,83	0,88	0,88	0,91
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	0,96	0,88	0,89	0,90	0,90	0,93
PGA 0,6 g	1,15	1,03	0,94	0,94	0,95	0,96	0,99
PGA 0,8 g	1,21	1,09	0,99	0,99	1,00	1,01	1,04
PGA 1,0 g	1,24	1,13	1,03	1,02	1,04	1,06	1,09
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	1,01	0,91	0,90	0,91	0,93	0,97
PGA 0,6 g	1,16	1,08	0,98	0,96	0,97	0,99	1,04
PGA 0,8 g	1,17	1,11	1,03	1,02	1,02	1,05	1,10
PGA 1,0 g	1,16	1,13	1,07	1,05	1,07	1,10	1,16
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,96	0,99	0,95	0,91	0,90	1,02	1,09
PGA 0,6 g	0,94	0,97	0,96	0,92	0,91	1,02	1,09
PGA 0,8 g	0,92	0,95	0,95	0,92	0,91	1,02	1,07
PGA 1,0 g	0,91	0,94	0,94	0,92	0,91	1,02	1,06

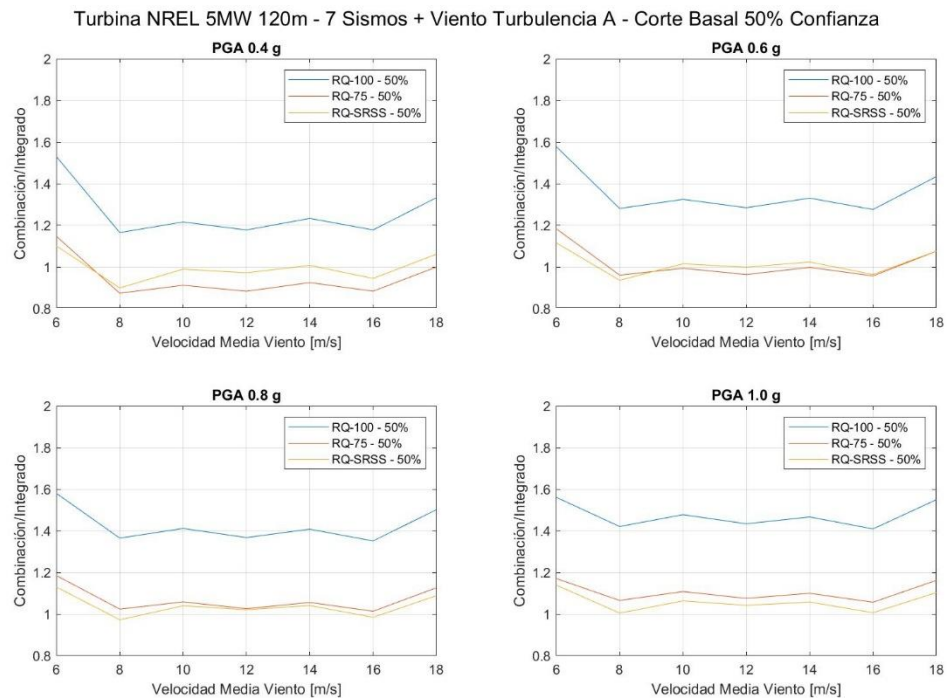
**Tabla E.18 Resultados Torre 120 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,97	0,99	0,99	0,96	0,99	0,98	1,00
PGA 0,6 g	0,99	0,99	0,99	0,96	1,00	0,99	1,00
PGA 0,8 g	1,01	1,00	1,00	0,97	1,01	0,99	1,01
PGA 1,0 g	1,03	1,01	1,00	0,98	1,01	1,00	1,01
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	1,03	1,00	1,02	1,04	1,04	1,06
PGA 0,6 g	1,11	1,05	1,00	1,03	1,04	1,05	1,07
PGA 0,8 g	1,14	1,06	1,01	1,03	1,05	1,06	1,08
PGA 1,0 g	1,17	1,08	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	1,05	1,00	1,01	1,03	1,05	1,09
PGA 0,6 g	1,10	1,07	1,01	1,02	1,04	1,06	1,11
PGA 0,8 g	1,10	1,07	1,03	1,03	1,05	1,08	1,13
PGA 1,0 g	1,11	1,07	1,04	1,04	1,06	1,10	1,15
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,95	1,03	1,04	1,01	1,01	1,16	1,24
PGA 0,6 g	0,89	0,96	0,99	0,97	0,96	1,11	1,17
PGA 0,8 g	0,87	0,92	0,95	0,93	0,93	1,06	1,11
PGA 1,0 g	0,86	0,89	0,91	0,91	0,90	1,03	1,07

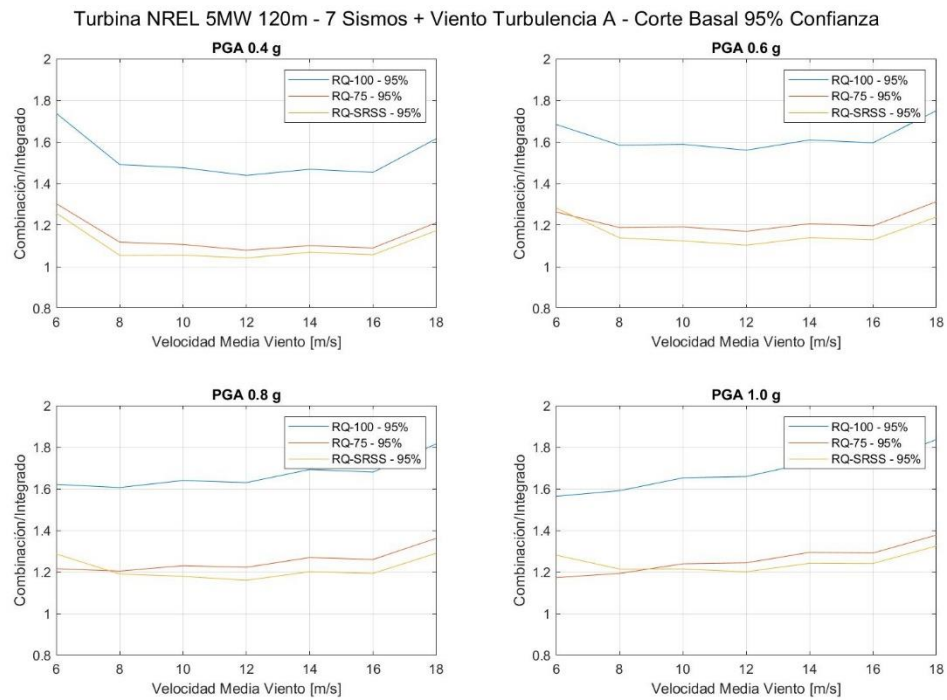


# Anexo F

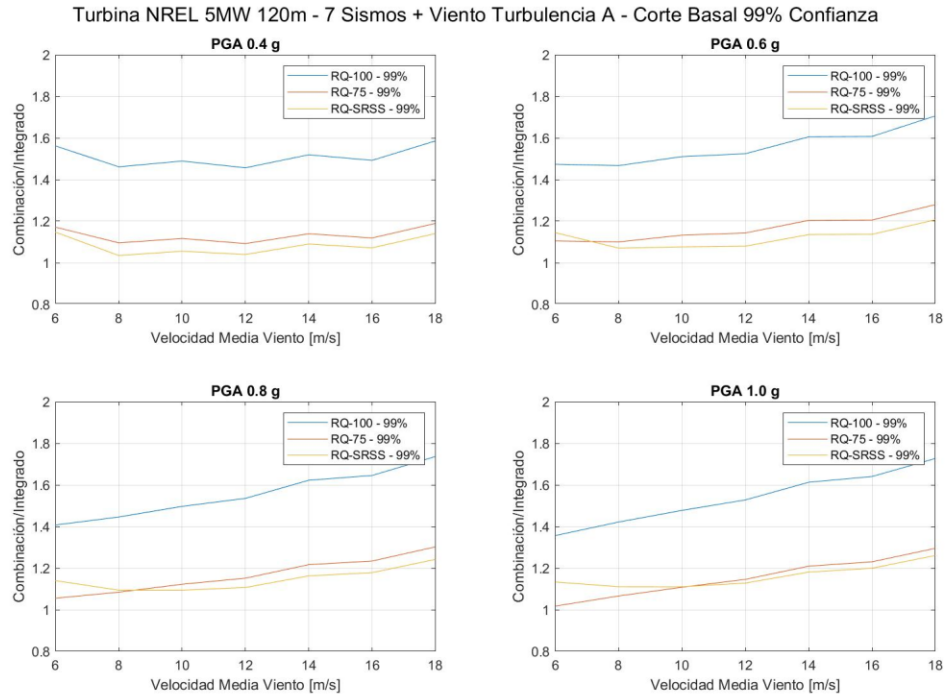
## Gráficos Resultados Torre 120 m



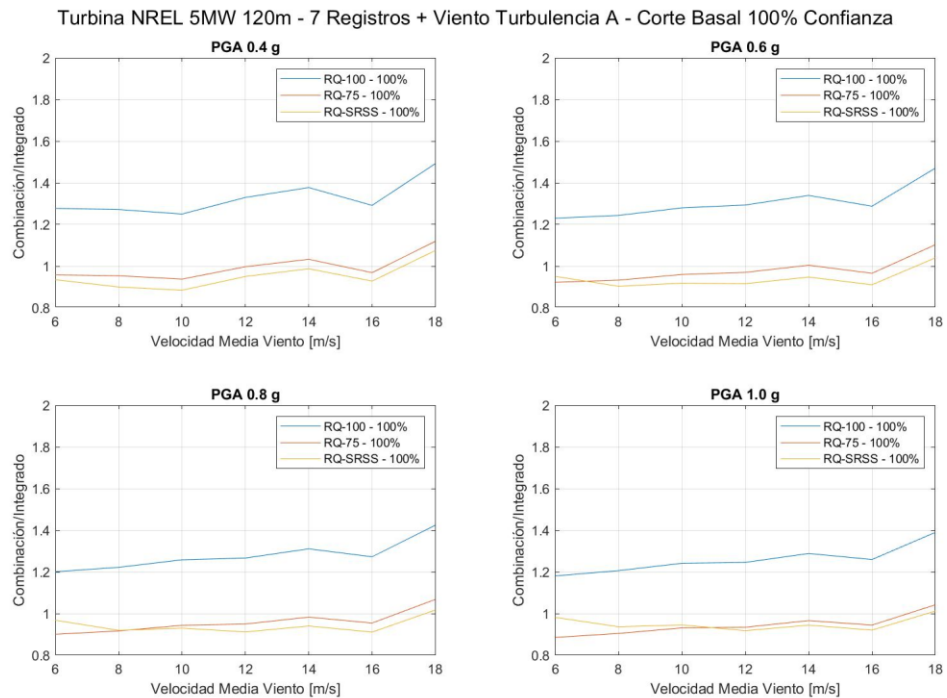
**Figura F.1 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A**



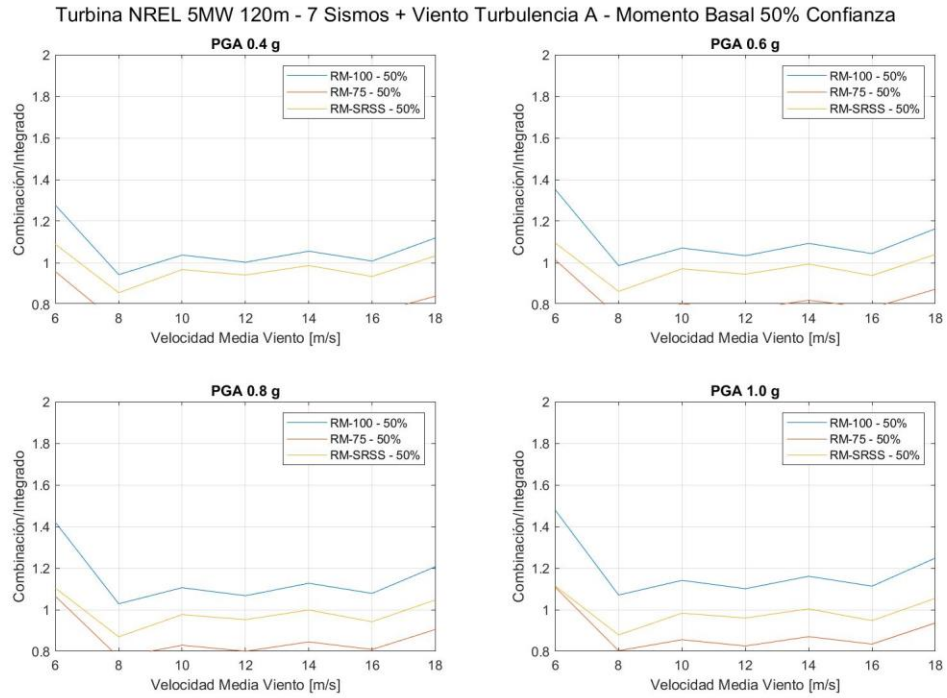
**Figura F.2 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A**



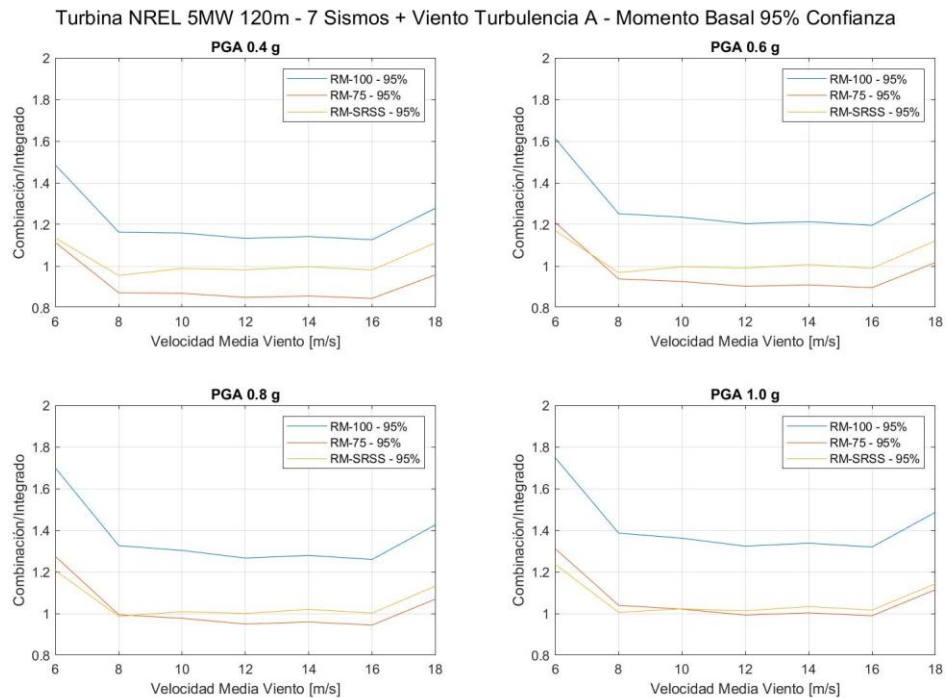
**Figura F.3 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



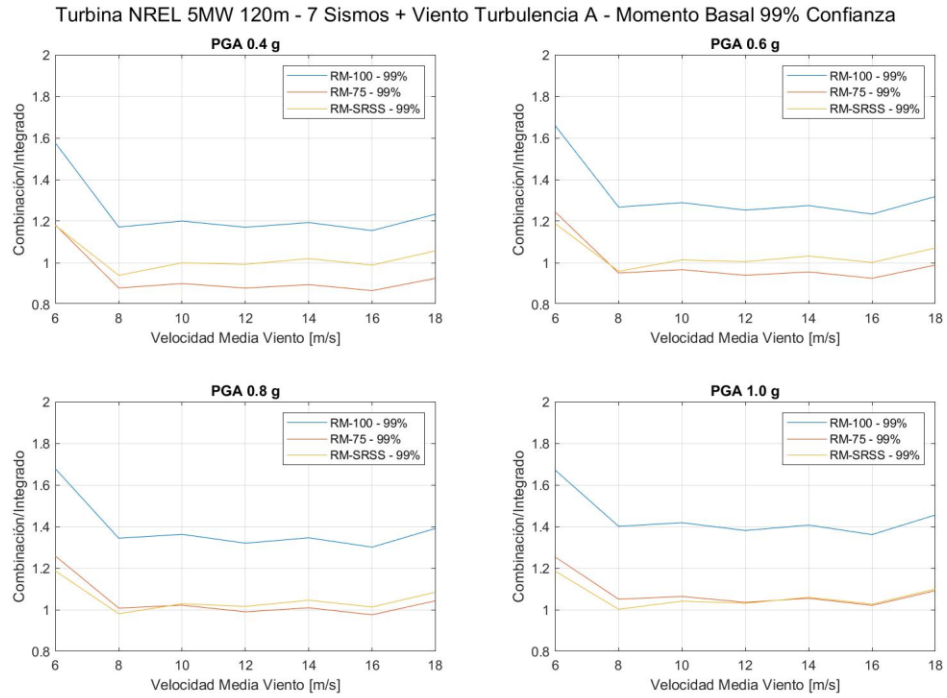
**Figura F.4 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**



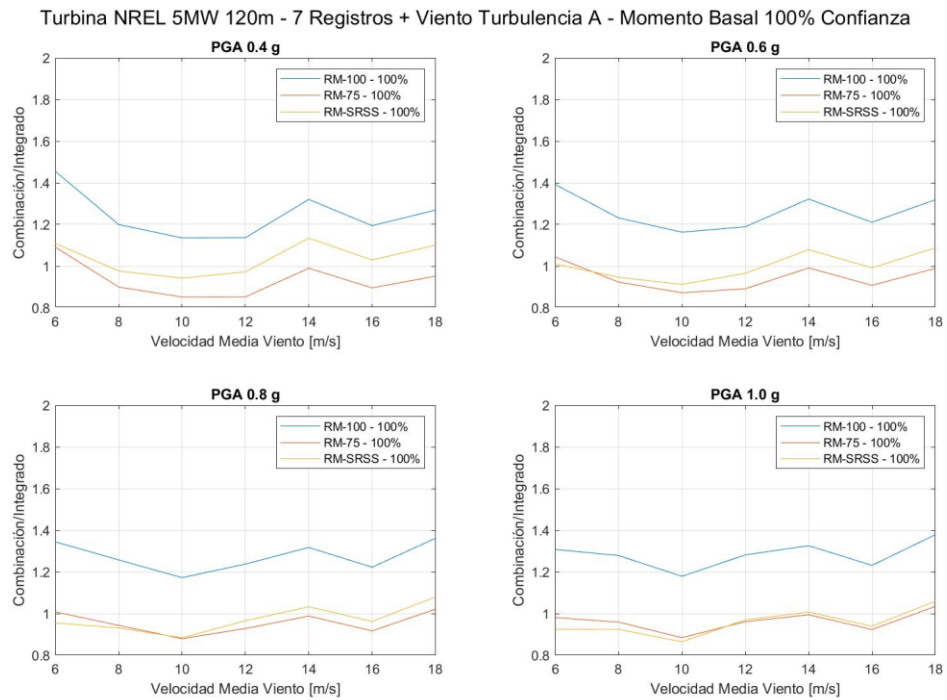
**Figura F.5 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A**



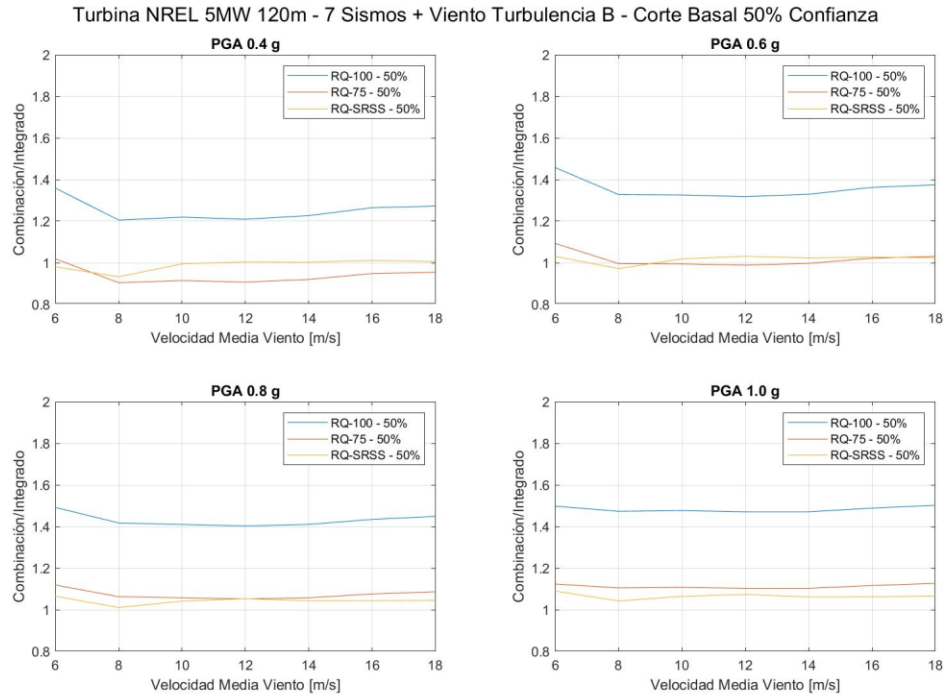
**Figura F.6 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A**



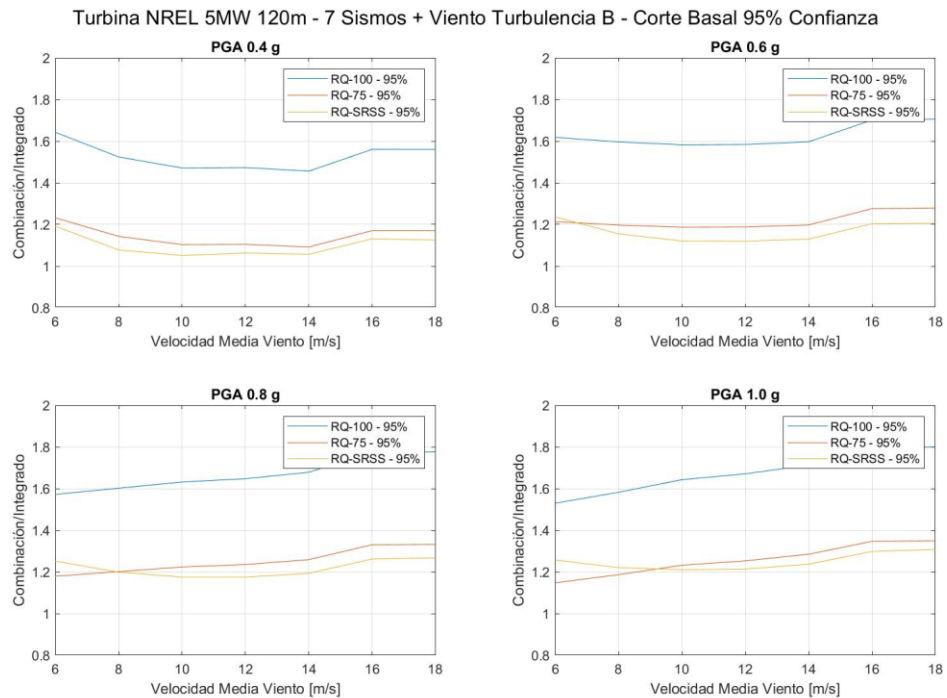
**Figura F.7 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



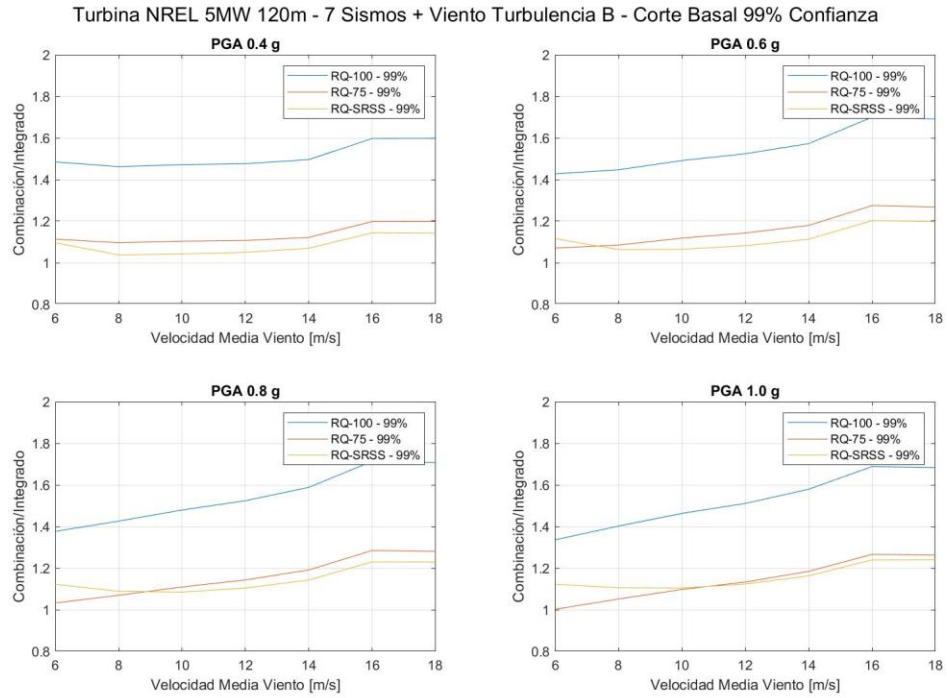
**Figura F.8 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**



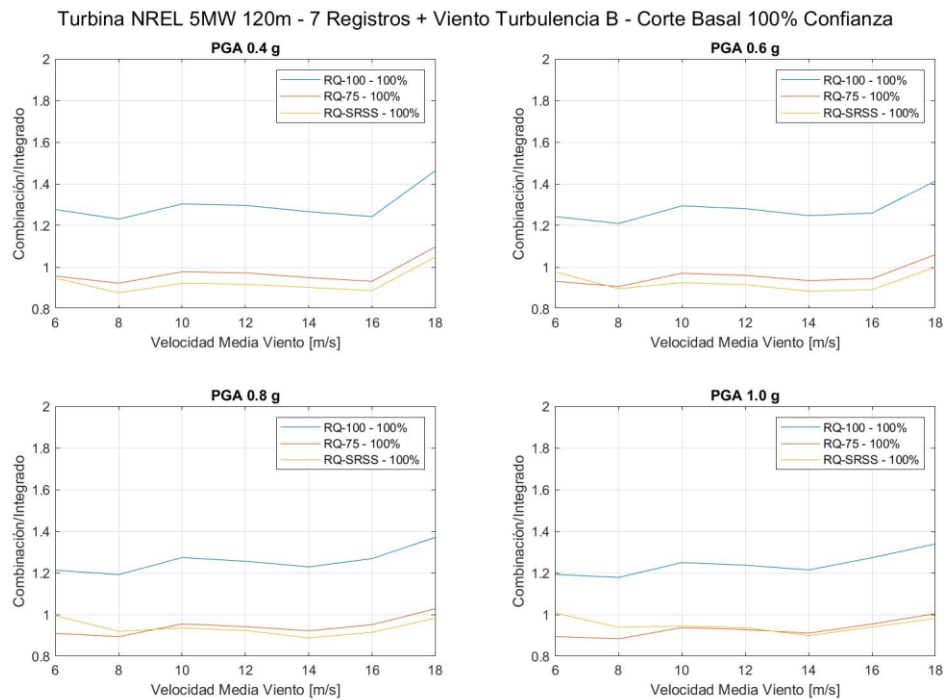
**Figura F.9 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel B**



**Figura F.10 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel B**

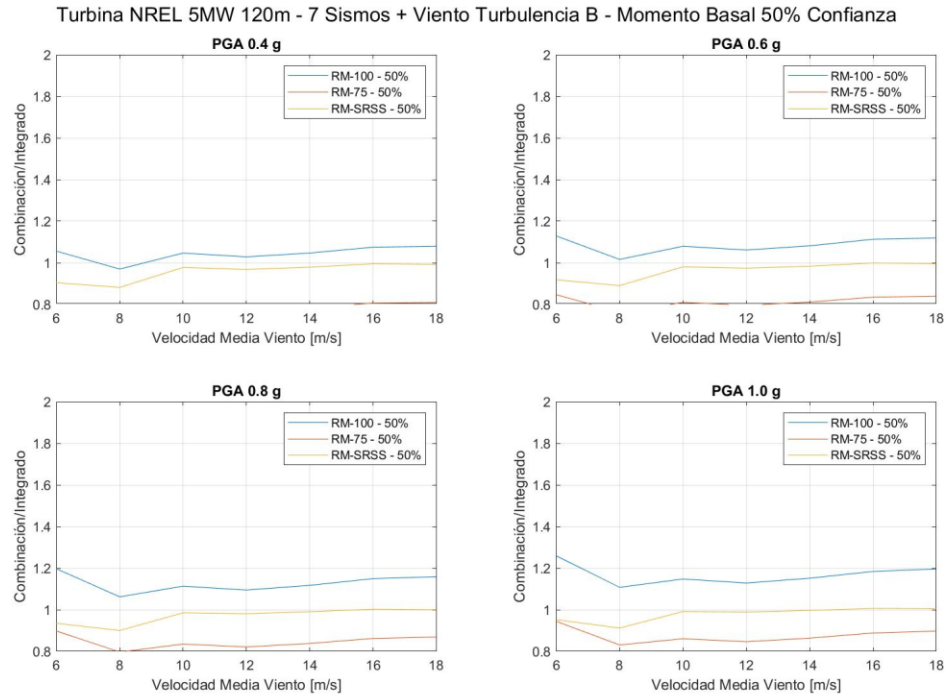


**Figura F.11 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel B**

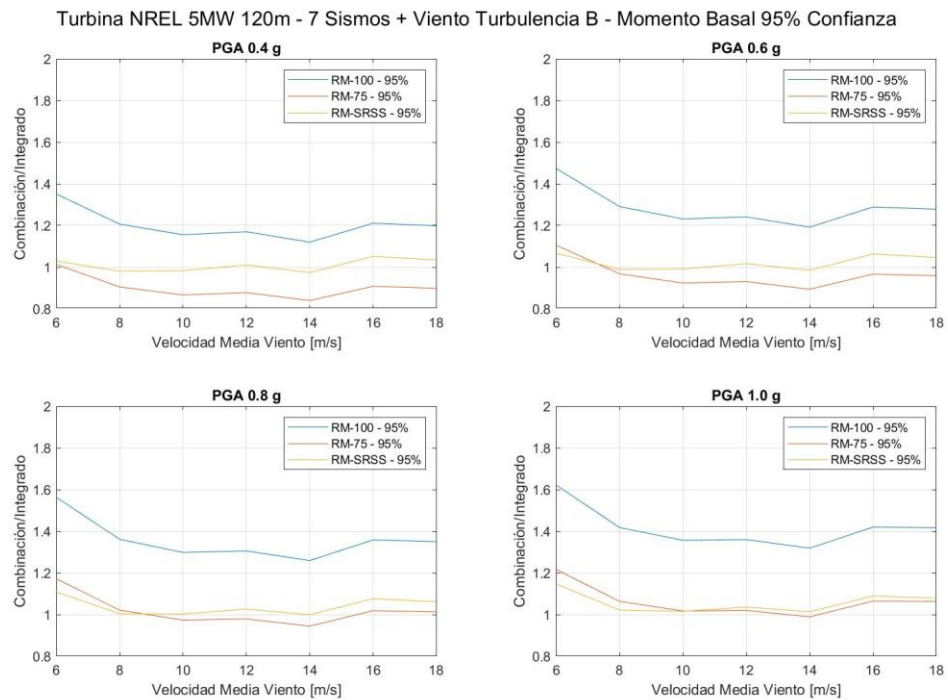


**Figura F.12 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel B**

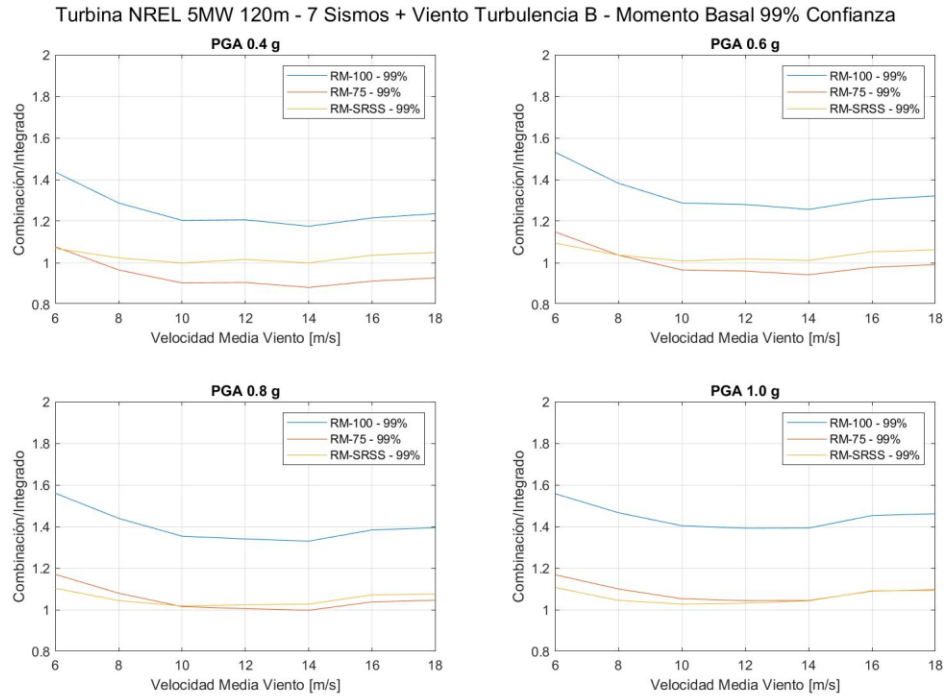




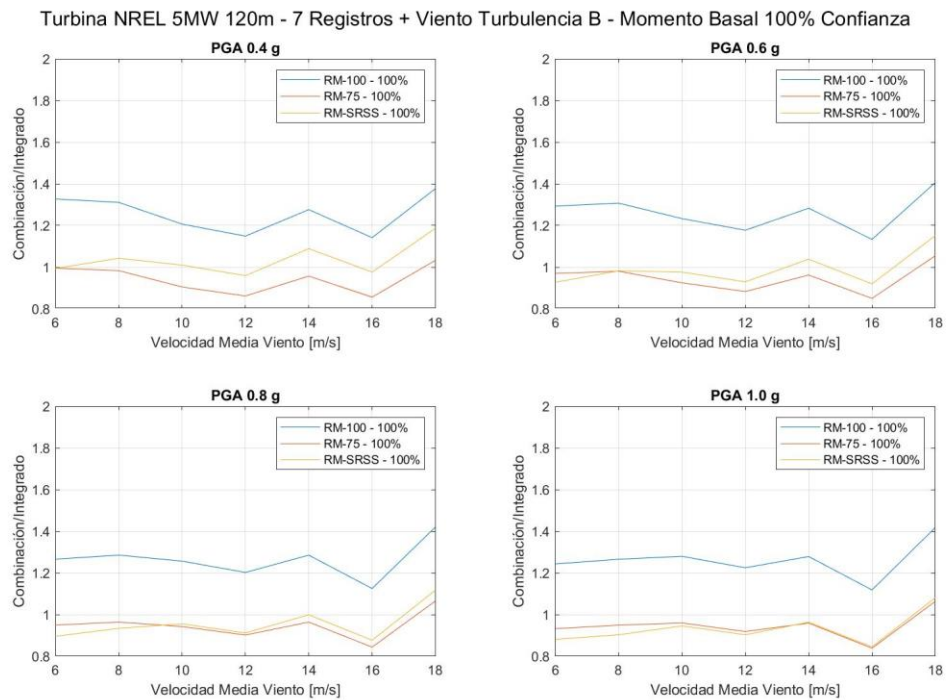
**Figura F.13 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel B**



**Figura F.14 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel B**

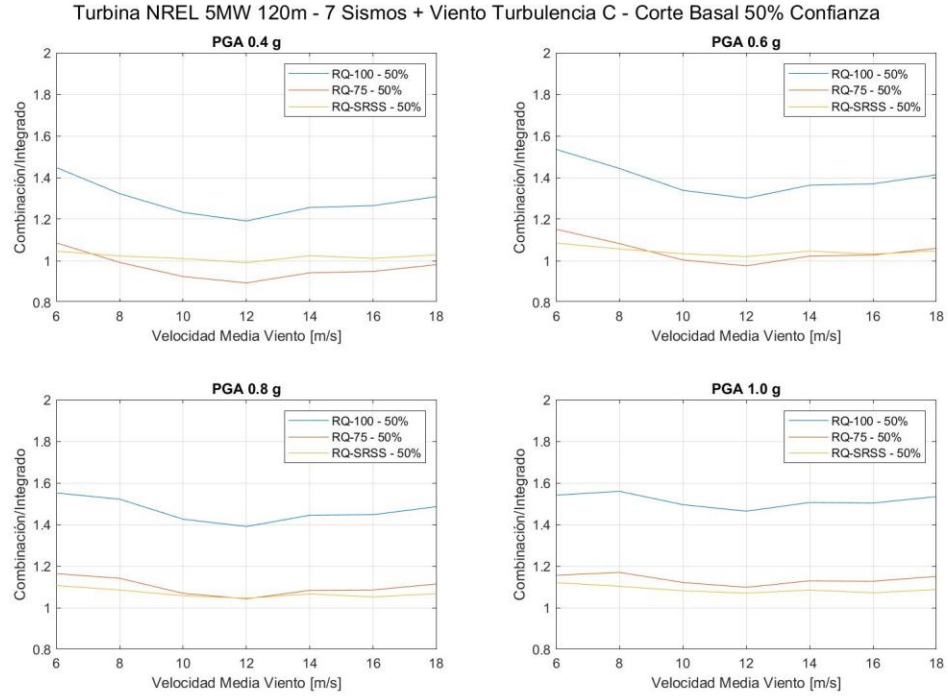


**Figura F.15 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel B**

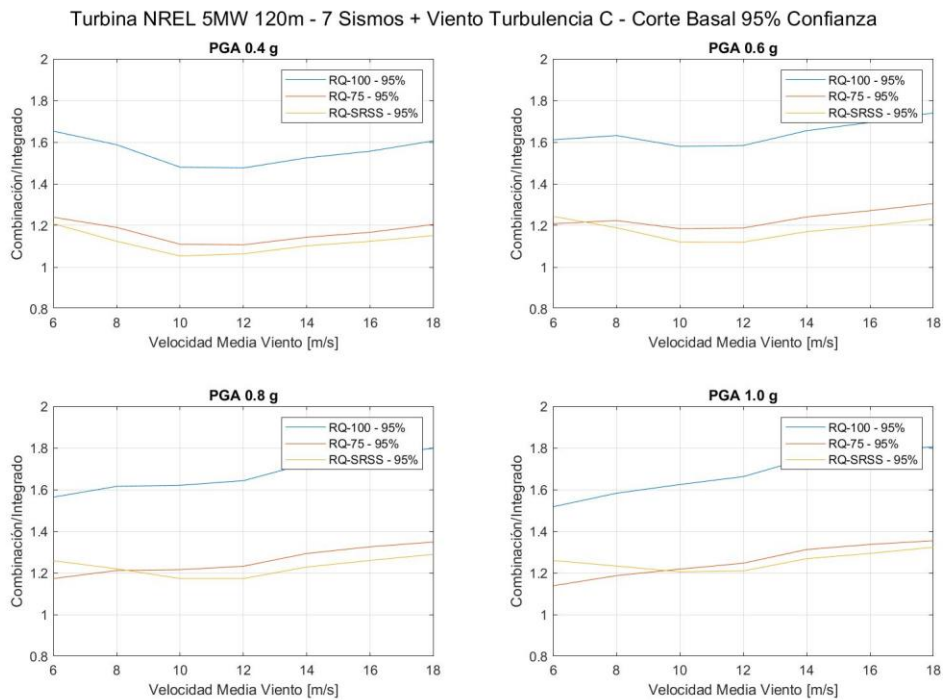


**Figura F.16 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel B**

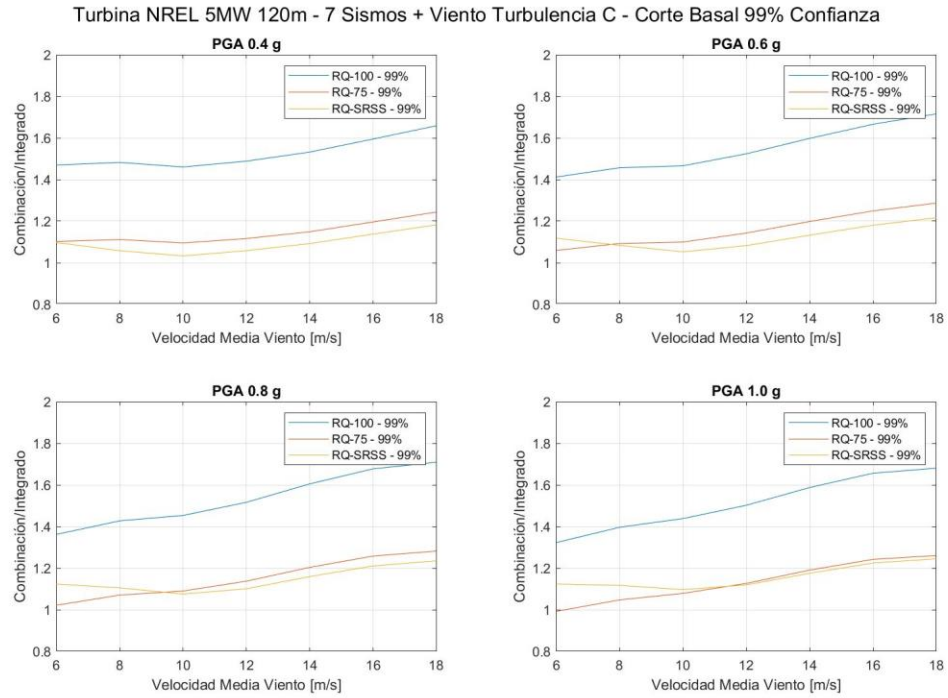




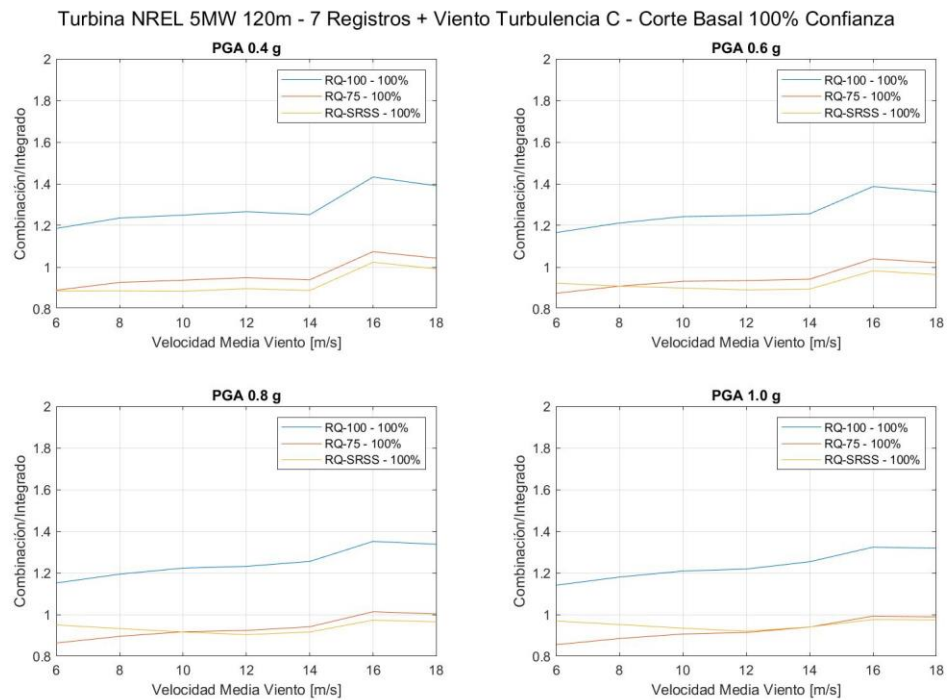
**Figura F.17 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**



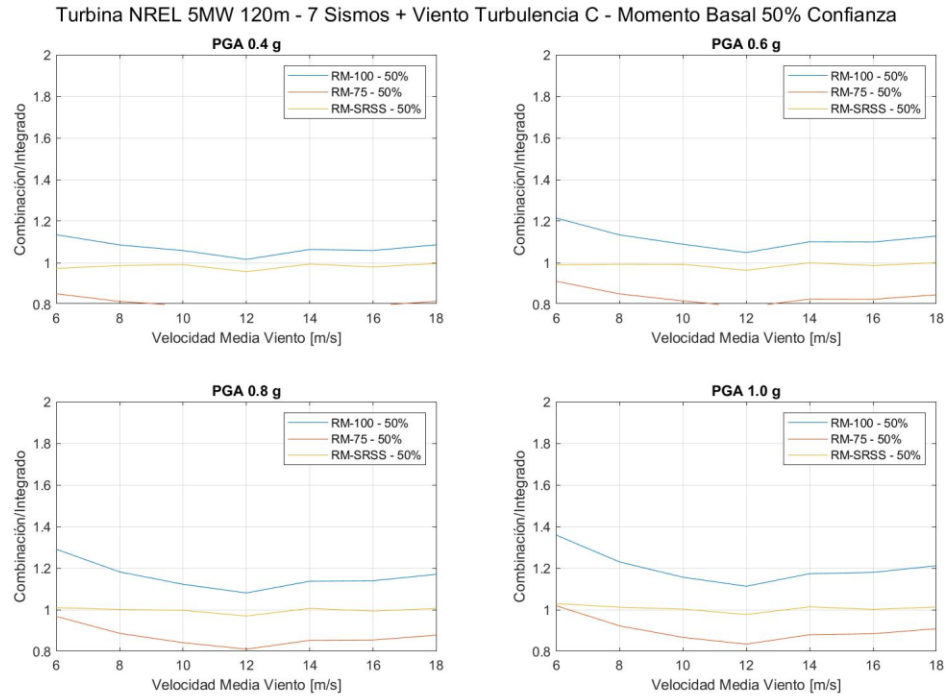
**Figura F.18 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**



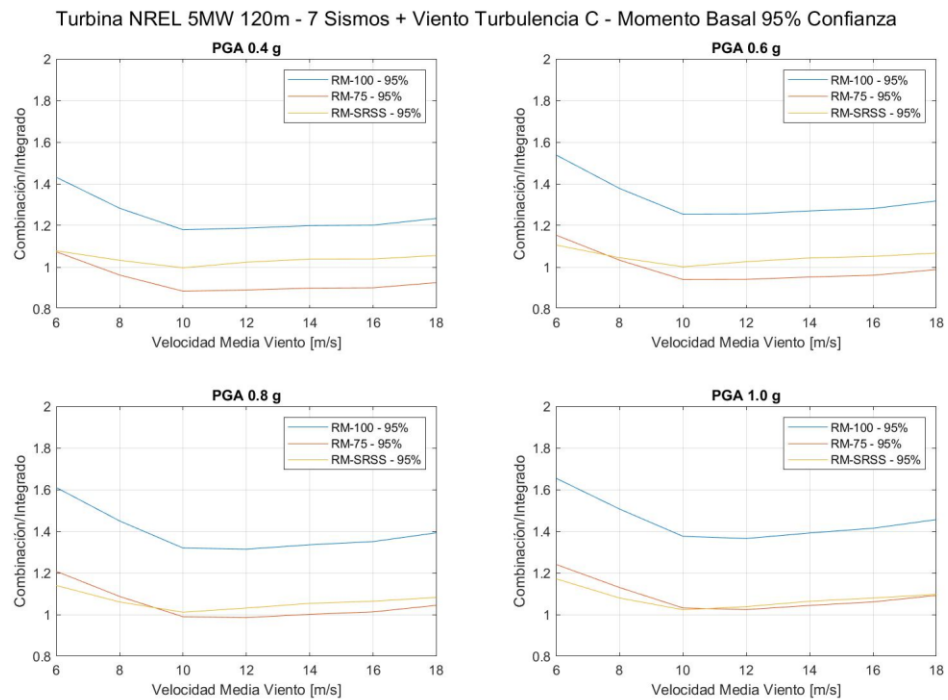
**Figura F.19 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel C**



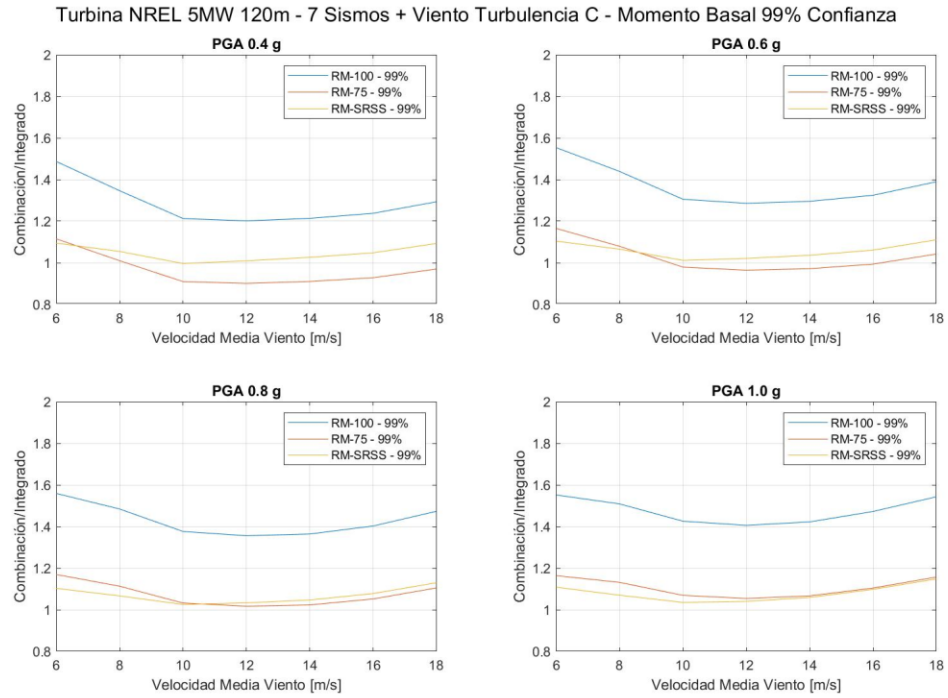
**Figura F.20 Resultados Torre 120 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel C**



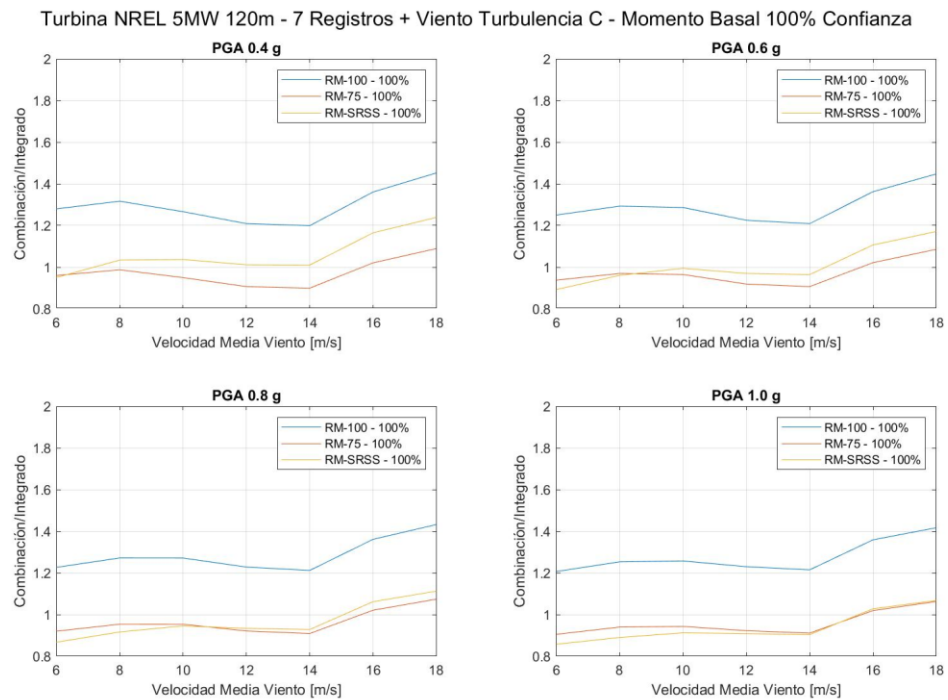
**Figura F.21 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura F.22 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura F.23 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura F.24 Resultados Torre 120 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel C**

# Anexo G

## Tablas Resultados Torre 150 m

Tabla G.1 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,23	1,26	1,20	1,24	1,19	1,35
PGA 0,6 g	1,53	1,34	1,37	1,31	1,33	1,28	1,43
PGA 0,8 g	1,44	1,35	1,40	1,35	1,35	1,30	1,43
PGA 1,0 g	1,46	1,42	1,47	1,43	1,42	1,37	1,48
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,58	1,41	1,38	1,38	1,39	1,37	1,52
PGA 0,6 g	1,50	1,45	1,45	1,45	1,49	1,46	1,59
PGA 0,8 g	1,42	1,43	1,45	1,46	1,50	1,49	1,59
PGA 1,0 g	1,37	1,41	1,45	1,47	1,51	1,50	1,58
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,56	1,45	1,45	1,44	1,47	1,47	1,57
PGA 0,6 g	1,46	1,45	1,47	1,48	1,52	1,54	1,64
PGA 0,8 g	1,38	1,41	1,45	1,47	1,52	1,55	1,63
PGA 1,0 g	1,33	1,37	1,42	1,44	1,50	1,53	1,60
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,42	1,43	1,28	1,44	1,35	1,28	1,48
PGA 0,6 g	1,36	1,36	1,25	1,40	1,31	1,26	1,42
PGA 0,8 g	1,32	1,32	1,23	1,35	1,28	1,23	1,37
PGA 1,0 g	1,29	1,29	1,22	1,32	1,26	1,22	1,33

Tabla G.2 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R75

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	1,02
PGA 0,6 g	1,15	1,00	1,03	<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	1,07
PGA 0,8 g	1,08	1,01	1,05	1,01	1,01	<b>0,98</b>	1,07
PGA 1,0 g	1,10	1,06	1,10	1,07	1,06	1,03	1,11
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,19	1,06	1,04	1,04	1,05	1,03	1,14
PGA 0,6 g	1,13	1,09	1,08	1,09	1,11	1,10	1,19
PGA 0,8 g	1,06	1,07	1,09	1,10	1,13	1,11	1,19
PGA 1,0 g	1,03	1,06	1,09	1,10	1,13	1,12	1,19
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,17	1,09	1,09	1,08	1,10	1,10	1,18
PGA 0,6 g	1,10	1,08	1,10	1,11	1,14	1,15	1,23
PGA 0,8 g	1,04	1,05	1,08	1,10	1,14	1,16	1,22
PGA 1,0 g	<b>0,99</b>	1,03	1,06	1,08	1,12	1,15	1,20
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,07	<b>0,96</b>	1,08	1,01	<b>0,96</b>	1,11
PGA 0,6 g	1,02	1,02	<b>0,94</b>	1,05	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	1,06
PGA 0,8 g	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	1,01	<b>0,96</b>	<b>0,93</b>	1,02
PGA 1,0 g	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	<b>0,92</b>	<b>1,00</b>

**Tabla G.3 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	<b>0,93</b>	1,00	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	1,06
PGA 0,6 g	1,08	<b>0,96</b>	1,03	<b>0,99</b>	1,00	<b>0,95</b>	1,06
PGA 0,8 g	1,04	<b>0,96</b>	1,02	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	1,03
PGA 1,0 g	1,09	1,01	1,05	1,02	1,01	<b>0,97</b>	1,05
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	1,01	1,02	1,00	1,11
PGA 0,6 g	1,14	1,04	1,02	1,03	1,05	1,04	1,13
PGA 0,8 g	1,12	1,05	1,04	1,04	1,07	1,05	1,13
PGA 1,0 g	1,12	1,07	1,06	1,06	1,08	1,07	1,13
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	1,03	1,03	1,03	1,05	1,05	1,13
PGA 0,6 g	1,14	1,06	1,05	1,05	1,08	1,09	1,16
PGA 0,8 g	1,12	1,07	1,06	1,06	1,09	1,11	1,17
PGA 1,0 g	1,11	1,07	1,06	1,06	1,10	1,11	1,16
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,02	<b>0,90</b>	1,02	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	1,06
PGA 0,6 g	1,08	1,01	<b>0,91</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>0,89</b>	1,00
PGA 0,8 g	1,08	1,02	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>
PGA 1,0 g	1,10	1,03	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>

**Tabla G.4 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,38	1,25	1,26	1,24	1,24	1,28	1,29
PGA 0,6 g	1,44	1,37	1,37	1,35	1,33	1,36	1,36
PGA 0,8 g	1,39	1,39	1,40	1,38	1,36	1,37	1,37
PGA 1,0 g	1,43	1,46	1,47	1,46	1,42	1,43	1,42
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,49	1,44	1,37	1,38	1,37	1,47	1,46
PGA 0,6 g	1,45	1,45	1,43	1,45	1,46	1,55	1,54
PGA 0,8 g	1,38	1,41	1,43	1,46	1,48	1,56	1,54
PGA 1,0 g	1,35	1,40	1,43	1,46	1,49	1,55	1,54
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,48	1,47	1,43	1,44	1,45	1,54	1,51
PGA 0,6 g	1,41	1,44	1,45	1,46	1,49	1,60	1,57
PGA 0,8 g	1,35	1,39	1,43	1,45	1,50	1,59	1,56
PGA 1,0 g	1,30	1,35	1,40	1,42	1,47	1,55	1,53
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,41	1,36	1,36	1,22	1,25	1,22	1,33
PGA 0,6 g	1,35	1,31	1,31	1,21	1,23	1,23	1,34
PGA 0,8 g	1,31	1,28	1,28	1,19	1,21	1,21	1,35
PGA 1,0 g	1,28	1,26	1,26	1,19	1,20	1,20	1,32

**Tabla G.5 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,04	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>
PGA 0,6 g	1,08	1,03	1,02	1,01	<b>1,00</b>	1,02	1,02
PGA 0,8 g	1,04	1,04	1,05	1,04	1,02	1,03	1,02
PGA 1,0 g	1,07	1,09	1,11	1,10	1,07	1,07	1,07
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,12	1,08	1,03	1,04	1,03	1,10	1,09
PGA 0,6 g	1,09	1,09	1,07	1,09	1,09	1,16	1,15
PGA 0,8 g	1,04	1,06	1,07	1,09	1,11	1,17	1,16
PGA 1,0 g	1,01	1,05	1,07	1,10	1,12	1,16	1,15
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	1,10	1,08	1,08	1,08	1,16	1,14
PGA 0,6 g	1,06	1,08	1,09	1,10	1,12	1,20	1,18
PGA 0,8 g	1,01	1,04	1,07	1,09	1,12	1,19	1,17
PGA 1,0 g	<b>0,98</b>	1,01	1,05	1,07	1,10	1,17	1,15
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,02	1,02	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>
PGA 0,6 g	1,01	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,91</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	1,01
PGA 0,8 g	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	1,01
PGA 1,0 g	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,89</b>	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>

**Tabla G.6 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	1,00	1,00	<b>0,99</b>	1,01	<b>1,00</b>
PGA 0,6 g	1,02	<b>0,99</b>	1,03	1,03	1,00	1,01	1,00
PGA 0,8 g	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	1,03	1,03	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>
PGA 1,0 g	1,06	1,03	1,05	1,05	1,02	1,01	1,01
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	1,01	<b>0,98</b>	1,00	1,00	1,07	1,06
PGA 0,6 g	1,10	1,04	1,01	1,02	1,03	1,10	1,09
PGA 0,8 g	1,10	1,05	1,03	1,03	1,05	1,10	1,09
PGA 1,0 g	1,11	1,07	1,05	1,06	1,07	1,11	1,11
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,04	1,02	1,02	1,03	1,10	1,08
PGA 0,6 g	1,11	1,06	1,04	1,04	1,06	1,13	1,11
PGA 0,8 g	1,10	1,07	1,05	1,05	1,07	1,14	1,12
PGA 1,0 g	1,10	1,07	1,05	1,06	1,08	1,14	1,12
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,86</b>	<b>0,94</b>
PGA 0,6 g	1,09	1,00	<b>0,95</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,96</b>
PGA 0,8 g	1,09	1,02	<b>0,96</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>	<b>0,99</b>
PGA 1,0 g	1,10	1,03	<b>0,97</b>	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>

**Tabla G.7 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,49	1,38	1,27	1,23	1,28	1,27	1,32
PGA 0,6 g	1,53	1,48	1,39	1,34	1,38	1,36	1,41
PGA 0,8 g	1,45	1,48	1,43	1,39	1,40	1,37	1,40
PGA 1,0 g	1,48	1,53	1,51	1,47	1,47	1,43	1,46
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,49	1,47	1,40	1,40	1,47	1,46	1,50
PGA 0,6 g	1,44	1,47	1,44	1,45	1,53	1,53	1,56
PGA 0,8 g	1,37	1,43	1,43	1,46	1,52	1,53	1,55
PGA 1,0 g	1,34	1,40	1,42	1,46	1,52	1,53	1,54
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,46	1,48	1,45	1,46	1,52	1,52	1,59
PGA 0,6 g	1,39	1,43	1,44	1,48	1,54	1,56	1,62
PGA 0,8 g	1,33	1,38	1,41	1,46	1,52	1,55	1,60
PGA 1,0 g	1,28	1,34	1,38	1,43	1,49	1,52	1,55
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,38	1,31	1,30	1,36	1,33	1,35	1,41
PGA 0,6 g	1,33	1,28	1,27	1,36	1,29	1,35	1,41
PGA 0,8 g	1,29	1,25	1,25	1,31	1,26	1,31	1,40
PGA 1,0 g	1,27	1,24	1,23	1,29	1,24	1,29	1,40

**Tabla G.8 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,11	1,03	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>
PGA 0,6 g	1,14	1,11	1,04	1,01	1,04	1,02	1,06
PGA 0,8 g	1,09	1,11	1,07	1,04	1,05	1,03	1,05
PGA 1,0 g	1,11	1,15	1,13	1,10	1,10	1,07	1,09
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,12	1,10	1,05	1,05	1,10	1,09	1,12
PGA 0,6 g	1,08	1,10	1,08	1,09	1,15	1,15	1,17
PGA 0,8 g	1,03	1,07	1,07	1,09	1,14	1,15	1,16
PGA 1,0 g	1,00	1,05	1,07	1,09	1,14	1,15	1,15
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,11	1,09	1,10	1,14	1,14	1,20
PGA 0,6 g	1,04	1,08	1,08	1,11	1,16	1,17	1,22
PGA 0,8 g	<b>1,00</b>	1,04	1,06	1,09	1,14	1,16	1,20
PGA 1,0 g	<b>0,96</b>	1,01	1,03	1,07	1,12	1,14	1,17
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,04	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	1,02	<b>1,00</b>	1,01	1,06
PGA 0,6 g	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	1,02	<b>0,97</b>	1,02	1,06
PGA 0,8 g	<b>0,97</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	1,05
PGA 1,0 g	<b>0,96</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	1,05



**Tabla G.9 Resultados Torre 150 m – Corte Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,04	1,02	1,00	1,03	<b>1,00</b>	1,02
PGA 0,6 g	1,08	1,07	1,05	1,03	1,04	1,01	1,03
PGA 0,8 g	1,04	1,05	1,05	1,03	1,03	<b>0,99</b>	1,01
PGA 1,0 g	1,09	1,08	1,08	1,06	1,05	1,02	1,03
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	1,04	<b>1,00</b>	1,01	1,07	1,06	1,08
PGA 0,6 g	1,11	1,07	1,02	1,03	1,08	1,08	1,10
PGA 0,8 g	1,10	1,07	1,03	1,04	1,08	1,09	1,10
PGA 1,0 g	1,11	1,09	1,05	1,05	1,09	1,10	1,12
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,06	1,03	1,04	1,08	1,08	1,14
PGA 0,6 g	1,11	1,07	1,04	1,05	1,09	1,11	1,15
PGA 0,8 g	1,10	1,08	1,04	1,06	1,10	1,12	1,15
PGA 1,0 g	1,09	1,08	1,05	1,06	1,10	1,12	1,15
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	<b>0,96</b>	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,96</b>	1,00
PGA 0,6 g	1,09	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	1,01
PGA 0,8 g	1,10	1,01	<b>0,96</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	1,03
PGA 1,0 g	1,11	1,03	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	1,06

**Tabla G.10 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,27	<b>0,97</b>	1,04	<b>0,99</b>	1,05	1,00	1,15
PGA 0,6 g	1,36	1,02	1,08	1,02	1,09	1,04	1,19
PGA 0,8 g	1,43	1,06	1,11	1,05	1,12	1,07	1,22
PGA 1,0 g	1,50	1,11	1,15	1,09	1,16	1,11	1,26
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,45	1,13	1,10	1,14	1,11	1,09	1,25
PGA 0,6 g	1,56	1,20	1,17	1,20	1,17	1,15	1,31
PGA 0,8 g	1,64	1,26	1,22	1,24	1,22	1,20	1,36
PGA 1,0 g	1,68	1,31	1,27	1,29	1,26	1,24	1,41
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,60	1,15	1,15	1,16	1,18	1,13	1,20
PGA 0,6 g	1,69	1,24	1,23	1,24	1,25	1,20	1,28
PGA 0,8 g	1,73	1,32	1,30	1,30	1,31	1,27	1,35
PGA 1,0 g	1,73	1,38	1,36	1,36	1,37	1,33	1,41
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,52	1,28	1,13	1,17	1,27	1,23	1,34
PGA 0,6 g	1,49	1,33	1,15	1,22	1,27	1,22	1,39
PGA 0,8 g	1,49	1,39	1,18	1,28	1,28	1,23	1,44
PGA 1,0 g	1,48	1,39	1,21	1,34	1,29	1,24	1,49

**Tabla G.11 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,95	0,73	0,78	0,74	0,79	0,75	0,86
PGA 0,6 g	1,02	0,77	0,81	0,77	0,82	0,78	0,89
PGA 0,8 g	1,07	0,80	0,83	0,79	0,84	0,80	0,92
PGA 1,0 g	1,13	0,84	0,87	0,82	0,87	0,83	0,95
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	0,85	0,83	0,86	0,83	0,82	0,94
PGA 0,6 g	1,17	0,90	0,88	0,90	0,87	0,86	0,98
PGA 0,8 g	1,23	0,95	0,92	0,93	0,91	0,90	1,02
PGA 1,0 g	1,26	0,98	0,95	0,96	0,95	0,93	1,06
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,20	0,86	0,86	0,87	0,88	0,85	0,90
PGA 0,6 g	1,27	0,93	0,92	0,93	0,94	0,90	0,96
PGA 0,8 g	1,29	0,99	0,97	0,98	0,98	0,95	1,01
PGA 1,0 g	1,30	1,03	1,02	1,02	1,03	0,99	1,06
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,14	0,96	0,85	0,88	0,95	0,92	1,00
PGA 0,6 g	1,12	1,00	0,86	0,92	0,95	0,92	1,04
PGA 0,8 g	1,12	1,04	0,88	0,96	0,96	0,92	1,08
PGA 1,0 g	1,11	1,04	0,90	1,01	0,97	0,93	1,12

**Tabla G.12 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia A – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	0,88	0,97	0,93	0,98	0,93	1,06
PGA 0,6 g	1,10	0,89	0,97	0,93	0,99	0,93	1,06
PGA 0,8 g	1,11	0,90	0,98	0,94	0,99	0,94	1,06
PGA 1,0 g	1,13	0,91	0,99	0,95	1,00	0,94	1,06
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,13	0,95	0,96	1,01	0,99	0,97	1,11
PGA 0,6 g	1,16	0,95	0,97	1,01	0,99	0,98	1,11
PGA 0,8 g	1,18	0,96	0,97	1,01	1,00	0,98	1,12
PGA 1,0 g	1,19	0,97	0,98	1,01	1,01	0,99	1,12
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,21	0,93	0,97	0,99	1,02	0,98	1,04
PGA 0,6 g	1,22	0,95	0,98	1,01	1,03	0,99	1,06
PGA 0,8 g	1,22	0,97	0,99	1,02	1,04	1,00	1,07
PGA 1,0 g	1,22	0,99	1,01	1,03	1,05	1,02	1,09
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	1,03	0,93	0,99	1,07	1,05	1,15
PGA 0,6 g	1,08	1,02	0,90	0,99	1,02	1,00	1,14
PGA 0,8 g	1,06	1,02	0,88	0,99	0,99	0,96	1,14
PGA 1,0 g	1,05	1,00	0,88	1,01	0,97	0,94	1,14

**Tabla G.13 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,05	<b>0,97</b>	1,06	1,02	1,05	1,06	1,10
PGA 0,6 g	1,13	1,02	1,09	1,06	1,08	1,11	1,14
PGA 0,8 g	1,20	1,06	1,12	1,09	1,11	1,14	1,17
PGA 1,0 g	1,29	1,12	1,16	1,13	1,15	1,19	1,21
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,32	1,20	1,11	1,13	1,08	1,18	1,16
PGA 0,6 g	1,41	1,27	1,16	1,18	1,14	1,24	1,22
PGA 0,8 g	1,48	1,33	1,22	1,23	1,19	1,29	1,27
PGA 1,0 g	1,53	1,38	1,26	1,28	1,24	1,34	1,32
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,43	1,32	1,18	1,19	1,15	1,19	1,19
PGA 0,6 g	1,53	1,40	1,25	1,26	1,22	1,27	1,27
PGA 0,8 g	1,58	1,46	1,32	1,32	1,28	1,34	1,34
PGA 1,0 g	1,60	1,49	1,36	1,37	1,34	1,40	1,40
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,42	1,32	1,29	1,06	1,31	1,10	1,19
PGA 0,6 g	1,37	1,29	1,33	1,07	1,33	1,10	1,18
PGA 0,8 g	1,34	1,28	1,37	1,08	1,35	1,11	1,19
PGA 1,0 g	1,32	1,28	1,35	1,10	1,37	1,12	1,20

**Tabla G.14 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,78</b>	<b>0,73</b>	<b>0,79</b>	<b>0,77</b>	<b>0,78</b>	<b>0,80</b>	<b>0,82</b>
PGA 0,6 g	<b>0,85</b>	<b>0,76</b>	<b>0,82</b>	<b>0,79</b>	<b>0,81</b>	<b>0,83</b>	<b>0,85</b>
PGA 0,8 g	<b>0,90</b>	<b>0,80</b>	<b>0,84</b>	<b>0,82</b>	<b>0,83</b>	<b>0,86</b>	<b>0,88</b>
PGA 1,0 g	<b>0,96</b>	<b>0,84</b>	<b>0,87</b>	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,99</b>	<b>0,90</b>	<b>0,83</b>	<b>0,84</b>	<b>0,81</b>	<b>0,89</b>	<b>0,87</b>
PGA 0,6 g	1,06	<b>0,95</b>	<b>0,87</b>	<b>0,89</b>	<b>0,85</b>	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>
PGA 0,8 g	1,11	<b>1,00</b>	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	<b>0,89</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>
PGA 1,0 g	1,15	1,03	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,93</b>	1,01	<b>0,99</b>
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	<b>0,99</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>
PGA 0,6 g	1,15	1,05	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,92</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>
PGA 0,8 g	1,19	1,09	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	1,00	1,00
PGA 1,0 g	1,20	1,12	1,02	1,02	1,00	1,05	1,05
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,80</b>	<b>0,98</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>
PGA 0,6 g	1,02	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>
PGA 0,8 g	1,01	<b>0,96</b>	1,02	<b>0,81</b>	1,01	<b>0,83</b>	<b>0,89</b>
PGA 1,0 g	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	1,01	<b>0,82</b>	1,02	<b>0,84</b>	<b>0,90</b>

**Tabla G.15 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia B –  
Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	<b>0,89</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	1,01
PGA 0,6 g	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	1,01
PGA 0,8 g	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	<b>1,00</b>	1,01
PGA 1,0 g	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	1,00	1,01
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,03	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	1,05	1,03
PGA 0,6 g	1,04	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	1,05	1,03
PGA 0,8 g	1,06	1,00	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,97</b>	1,06	1,03
PGA 1,0 g	1,09	1,01	<b>0,97</b>	1,00	<b>0,98</b>	1,06	1,04
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,07	1,06	<b>0,99</b>	1,02	<b>0,99</b>	1,03	1,02
PGA 0,6 g	1,10	1,06	<b>1,00</b>	1,02	<b>1,00</b>	1,04	1,04
PGA 0,8 g	1,12	1,07	1,00	1,02	1,01	1,05	1,05
PGA 1,0 g	1,13	1,07	1,01	1,03	1,02	1,07	1,06
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,03	1,07	<b>0,88</b>	1,11	<b>0,93</b>	1,01
PGA 0,6 g	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	1,05	<b>0,84</b>	1,07	<b>0,88</b>	<b>0,95</b>
PGA 0,8 g	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	1,04	<b>0,82</b>	1,04	<b>0,86</b>	<b>0,92</b>
PGA 1,0 g	<b>0,94</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>	<b>0,81</b>	1,02	<b>0,84</b>	<b>0,90</b>

**Tabla G.16 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C –  
Combinación R100**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,15	1,11	1,06	1,03	1,06	1,05	1,08
PGA 0,6 g	1,24	1,16	1,09	1,06	1,10	1,09	1,13
PGA 0,8 g	1,31	1,20	1,12	1,09	1,13	1,13	1,17
PGA 1,0 g	1,40	1,26	1,16	1,13	1,18	1,17	1,22
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,37	1,24	1,17	1,15	1,19	1,16	1,20
PGA 0,6 g	1,46	1,32	1,23	1,21	1,25	1,22	1,26
PGA 0,8 g	1,52	1,38	1,28	1,25	1,30	1,28	1,31
PGA 1,0 g	1,56	1,43	1,32	1,30	1,34	1,32	1,36
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,47	1,33	1,23	1,20	1,24	1,21	1,28
PGA 0,6 g	1,55	1,43	1,31	1,28	1,31	1,28	1,36
PGA 0,8 g	1,57	1,47	1,38	1,34	1,36	1,34	1,43
PGA 1,0 g	1,58	1,51	1,42	1,38	1,41	1,40	1,49
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,44	1,35	1,28	1,31	1,21	1,31	1,32
PGA 0,6 g	1,37	1,30	1,26	1,34	1,29	1,36	1,36
PGA 0,8 g	1,33	1,28	1,25	1,34	1,34	1,40	1,41
PGA 1,0 g	1,31	1,27	1,24	1,33	1,37	1,45	1,43

**Tabla G.17 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación R75**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,86	0,83	0,79	0,77	0,80	0,79	0,81
PGA 0,6 g	0,93	0,87	0,82	0,79	0,83	0,82	0,85
PGA 0,8 g	0,99	0,90	0,84	0,82	0,85	0,85	0,88
PGA 1,0 g	1,05	0,94	0,87	0,85	0,88	0,88	0,91
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,03	0,93	0,88	0,86	0,89	0,87	0,90
PGA 0,6 g	1,10	0,99	0,92	0,90	0,94	0,92	0,95
PGA 0,8 g	1,14	1,04	0,96	0,94	0,98	0,96	0,98
PGA 1,0 g	1,17	1,07	0,99	0,97	1,01	0,99	1,02
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,10	1,00	0,92	0,90	0,93	0,91	0,96
PGA 0,6 g	1,16	1,07	0,98	0,96	0,98	0,96	1,02
PGA 0,8 g	1,18	1,11	1,03	1,00	1,02	1,01	1,07
PGA 1,0 g	1,19	1,13	1,06	1,04	1,06	1,05	1,11
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,08	1,01	0,96	0,98	0,91	0,99	0,99
PGA 0,6 g	1,02	0,98	0,94	1,00	0,97	1,02	1,02
PGA 0,8 g	1,00	0,96	0,93	1,01	1,00	1,05	1,06
PGA 1,0 g	0,98	0,95	0,93	1,00	1,03	1,09	1,07

**Tabla G.18 Resultados Torre 150 m – Momento Basal – Nivel de Turbulencia C – Combinación RSRSS**

Velocidad Media	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s	16 m/s	20 m/s
<b>50% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	0,98	1,00	0,99	0,96	0,99	0,97	0,99
PGA 0,6 g	1,01	1,01	0,99	0,97	1,00	0,98	1,00
PGA 0,8 g	1,03	1,01	1,00	0,97	1,00	0,98	1,00
PGA 1,0 g	1,06	1,03	1,00	0,98	1,01	0,99	1,01
<b>95% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,06	1,02	1,01	1,01	1,06	1,03	1,05
PGA 0,6 g	1,07	1,03	1,01	1,01	1,06	1,03	1,05
PGA 0,8 g	1,08	1,03	1,01	1,01	1,06	1,04	1,05
PGA 1,0 g	1,10	1,04	1,01	1,02	1,06	1,04	1,06
<b>99% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,09	1,05	1,02	1,02	1,06	1,04	1,10
PGA 0,6 g	1,10	1,07	1,03	1,03	1,06	1,04	1,10
PGA 0,8 g	1,11	1,07	1,04	1,03	1,06	1,05	1,11
PGA 1,0 g	1,12	1,07	1,04	1,04	1,07	1,06	1,12
<b>100% Confianza</b>							
PGA 0,4 g	1,05	1,04	1,04	1,09	1,02	1,11	1,11
PGA 0,6 g	0,97	0,96	0,96	1,06	1,03	1,09	1,09
PGA 0,8 g	0,94	0,92	0,92	1,02	1,03	1,08	1,09
PGA 1,0 g	0,94	0,90	0,89	0,98	1,02	1,09	1,07

# Anexo H

## Gráficos Resultados Torre 150 m

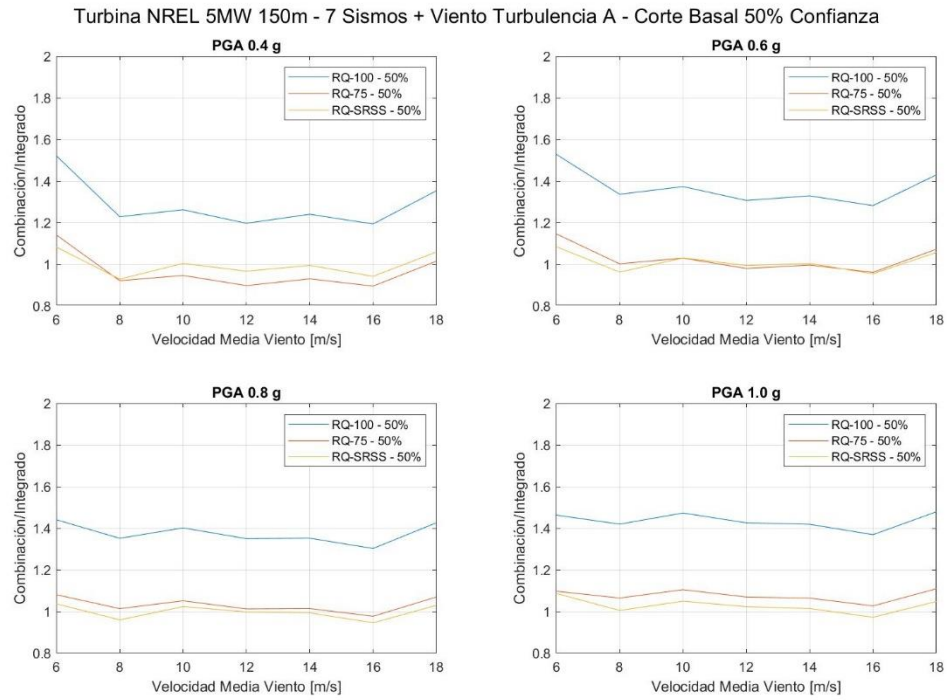


Figura H.1 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A

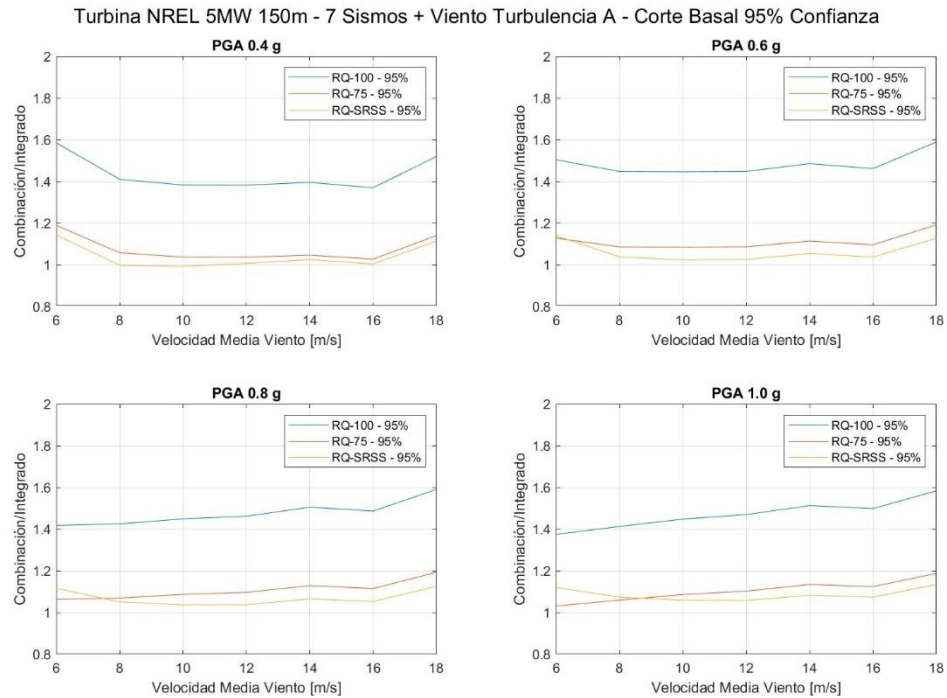
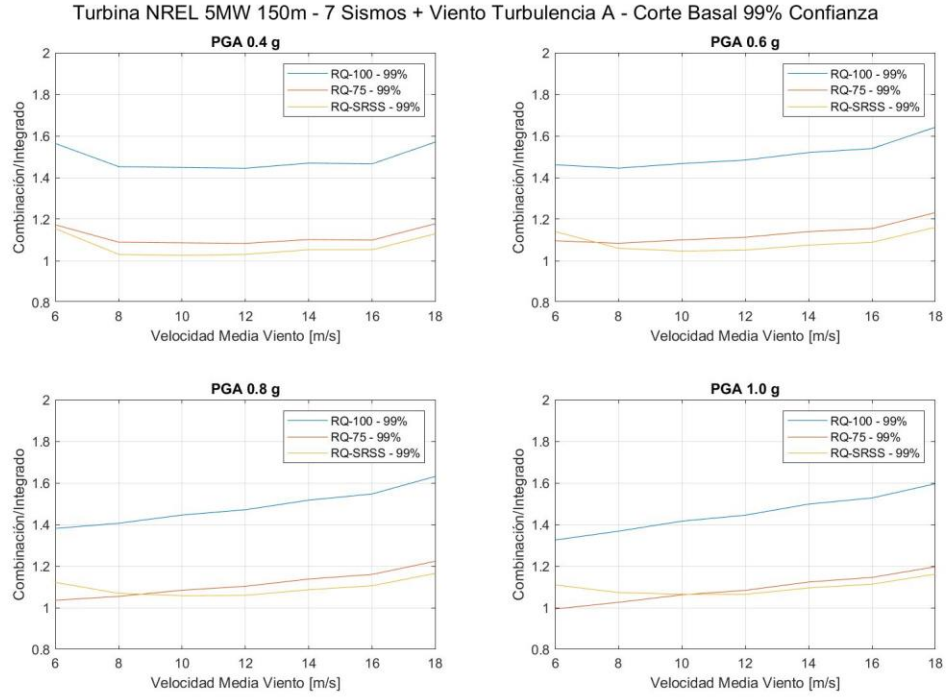
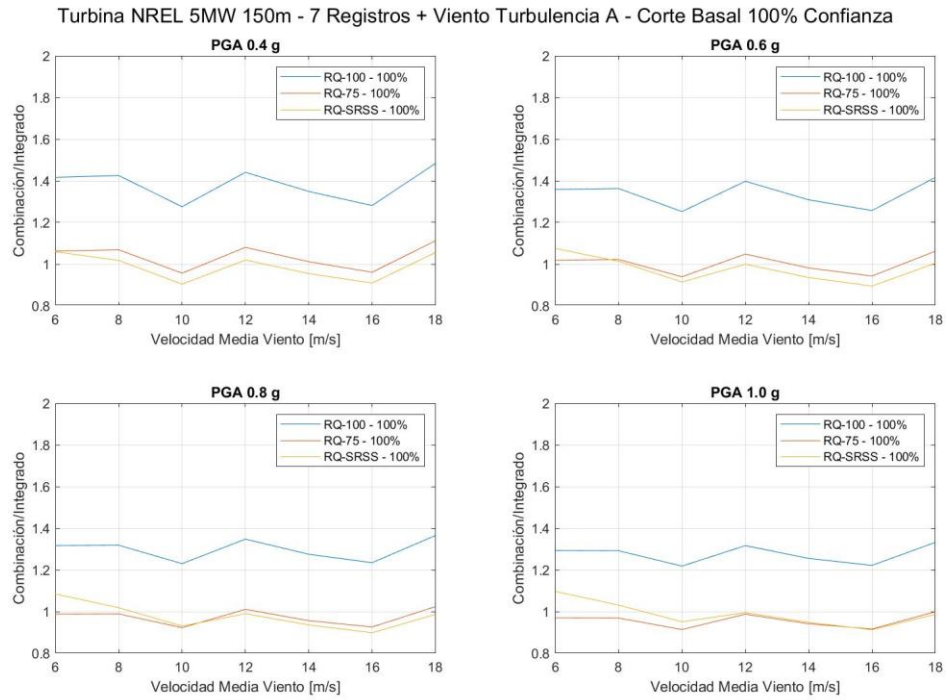


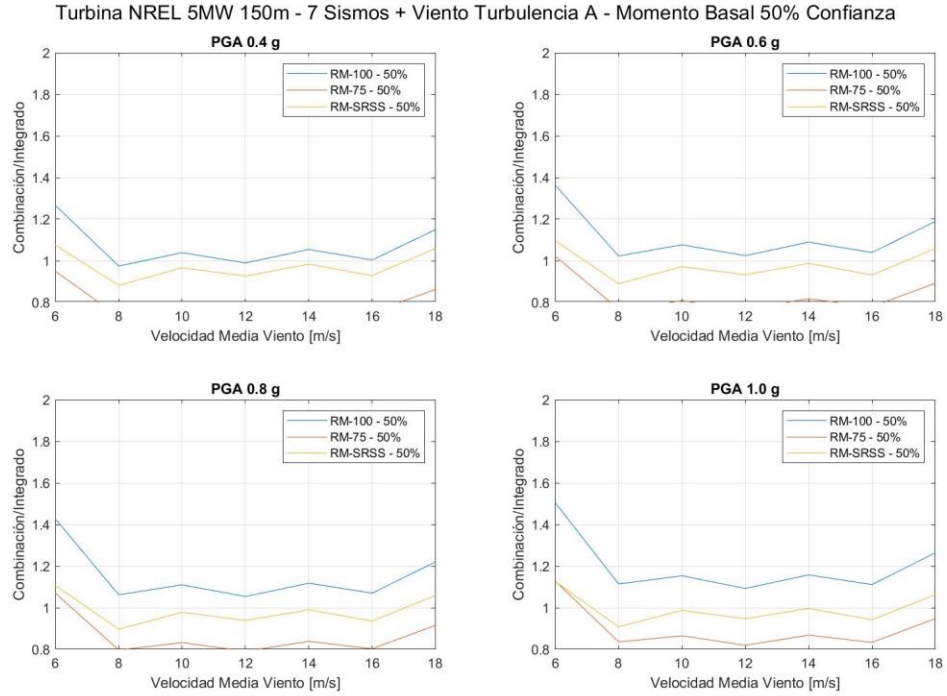
Figura H.2 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A



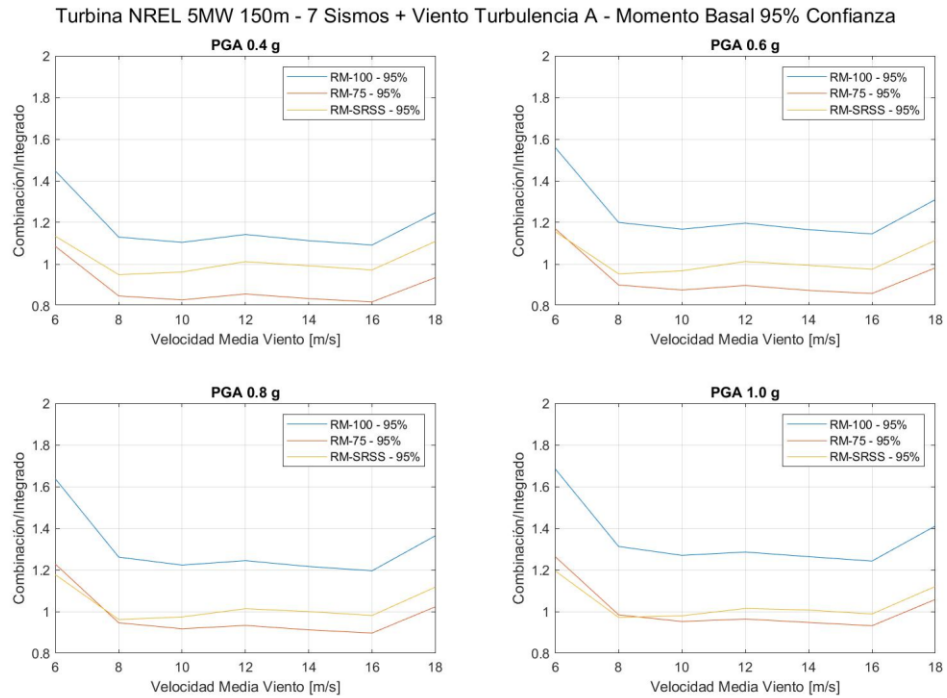
**Figura H.3 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



**Figura H.4 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**

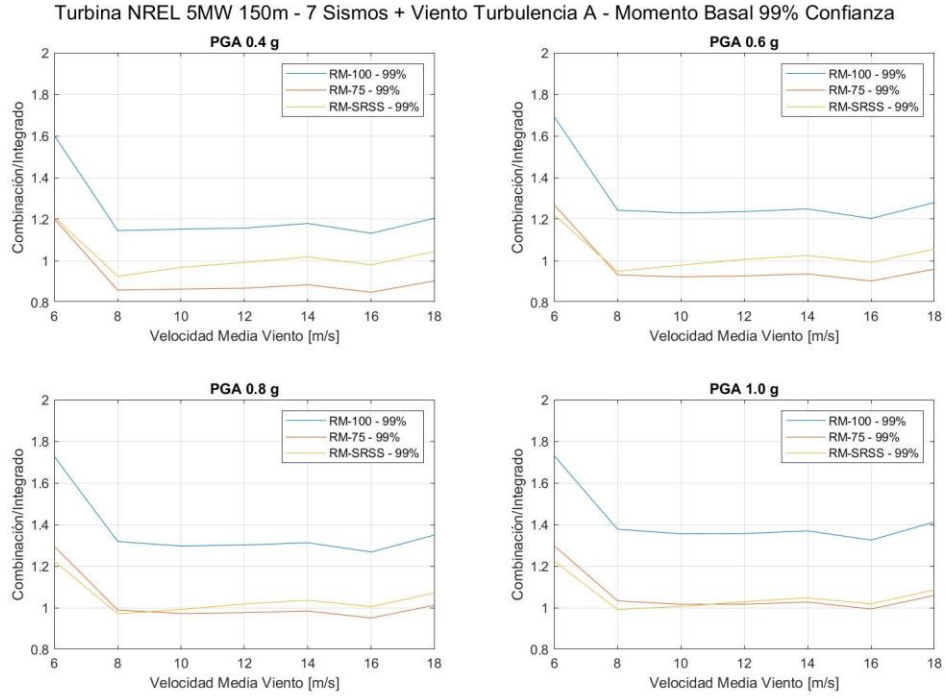


**Figura H.5 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel A**

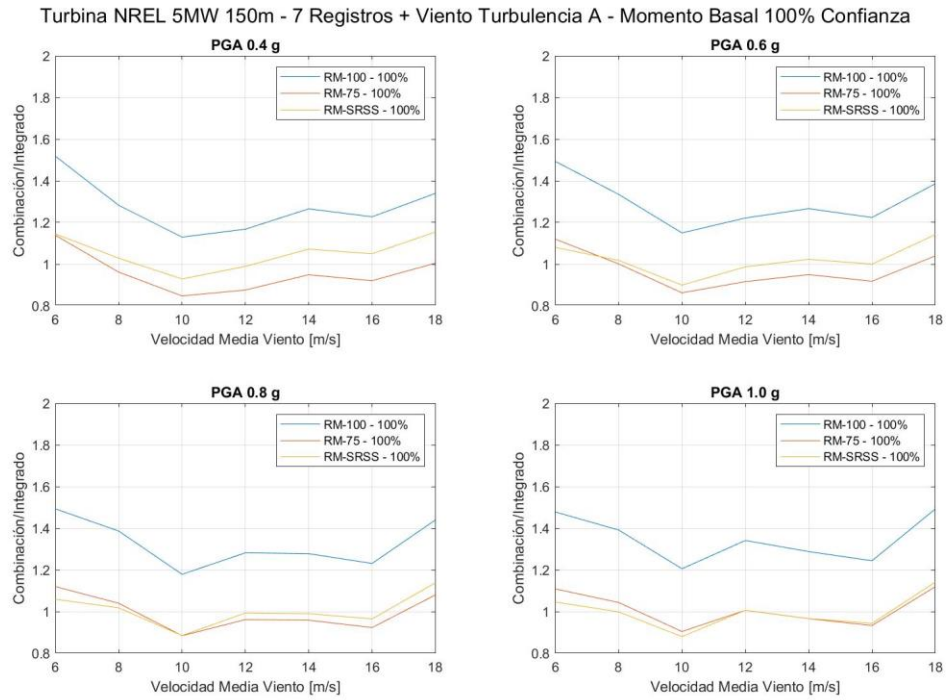


**Figura H.6 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel A**

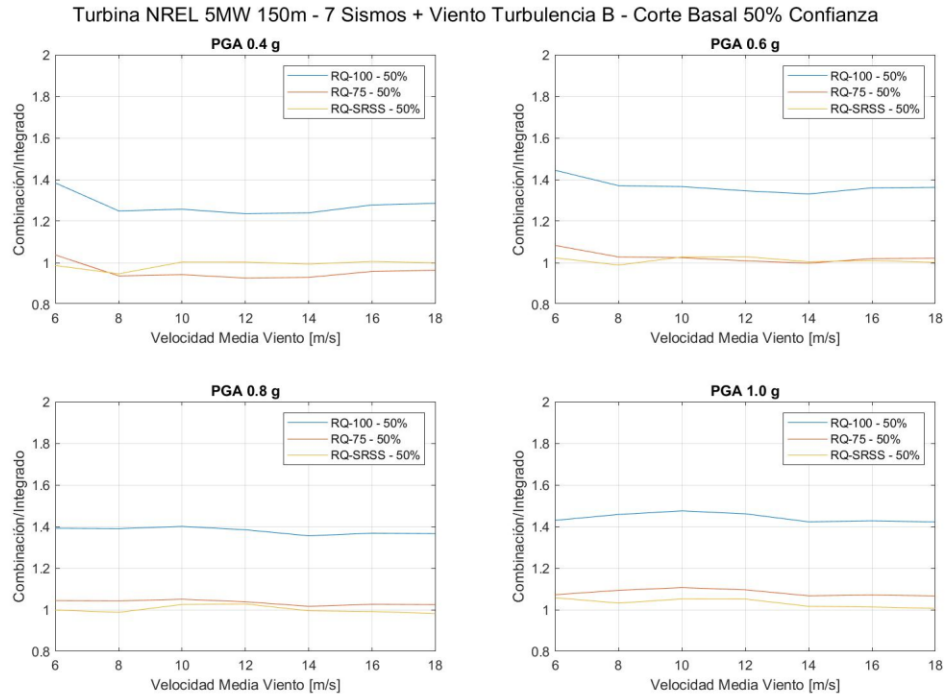




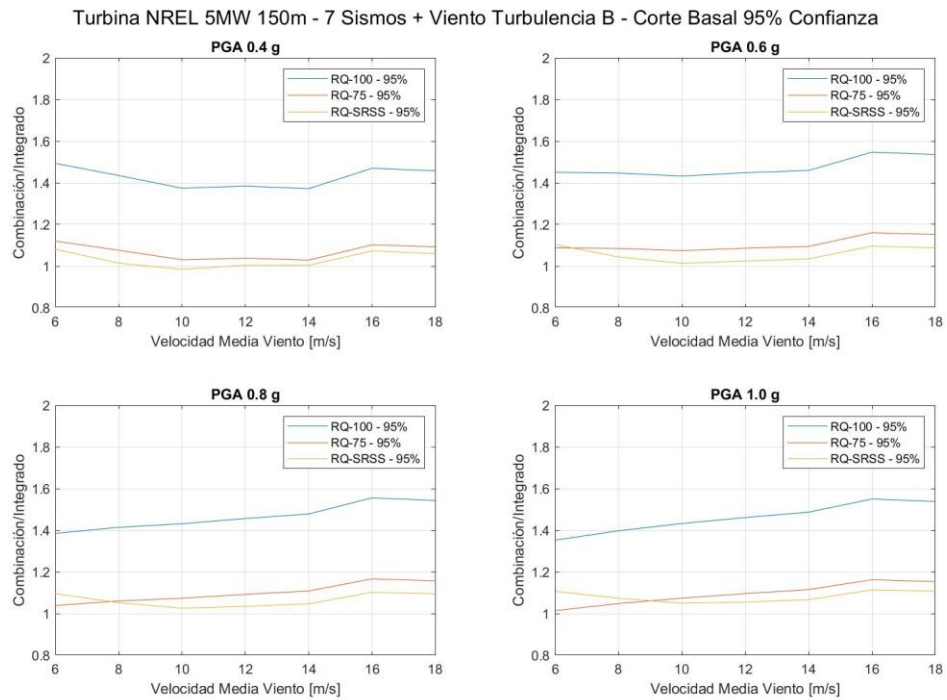
**Figura H.7 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel A**



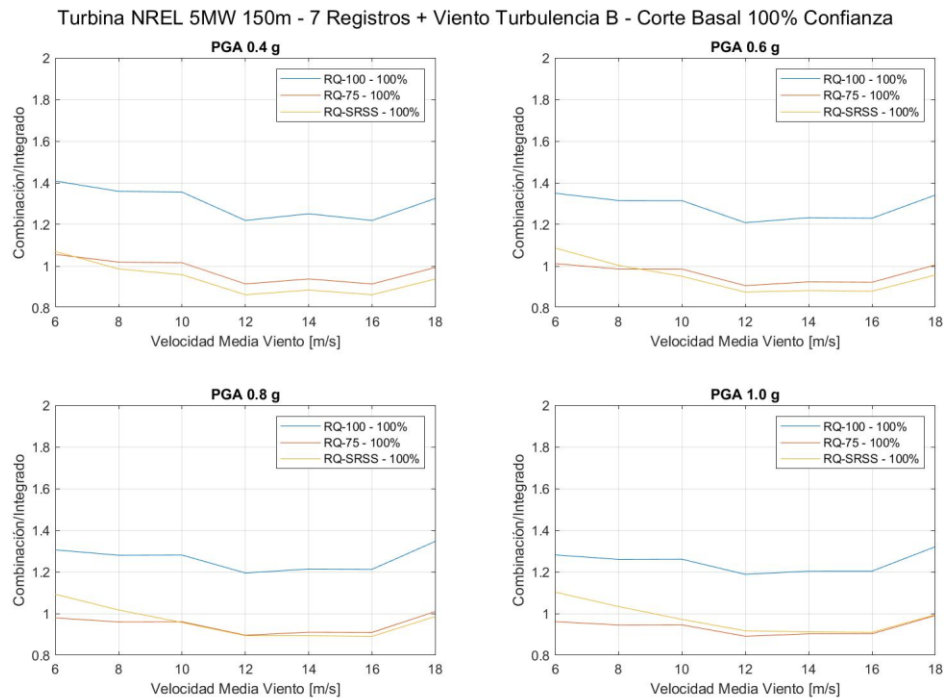
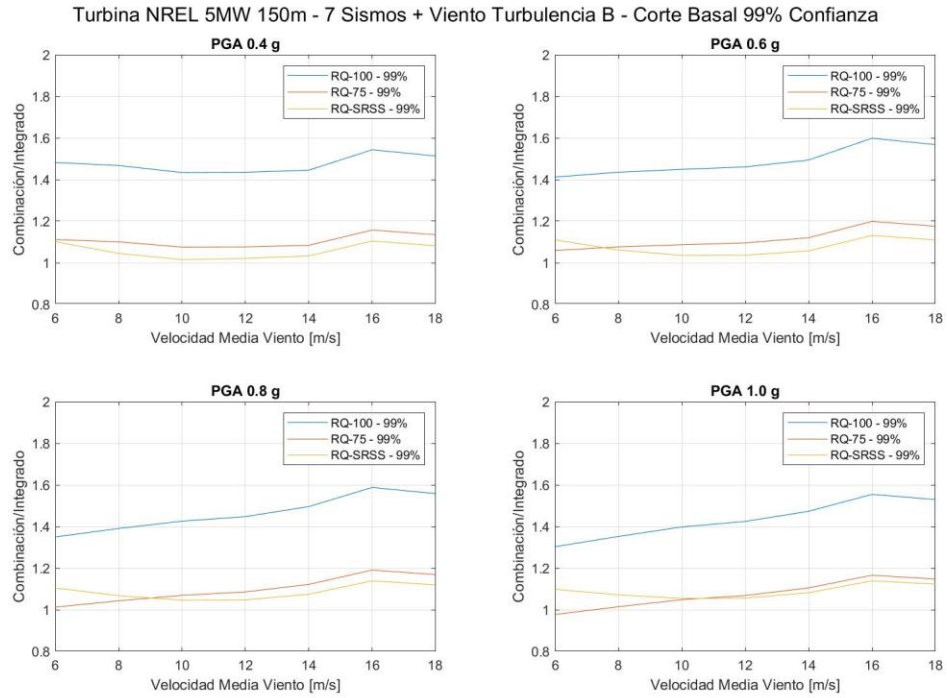
**Figura H.8 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel A**

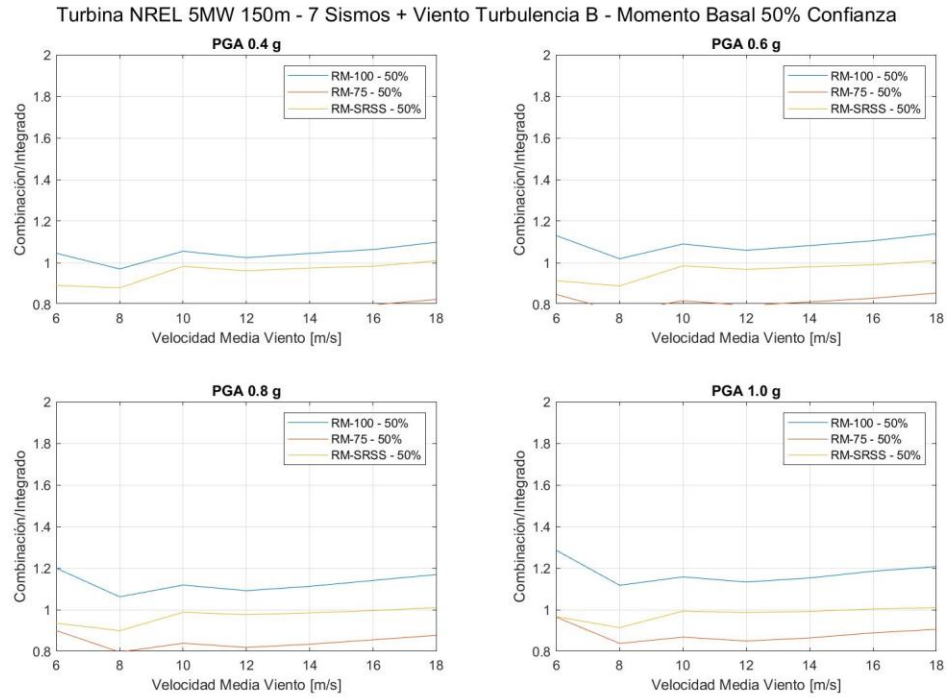


**Figura H.9 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel B**

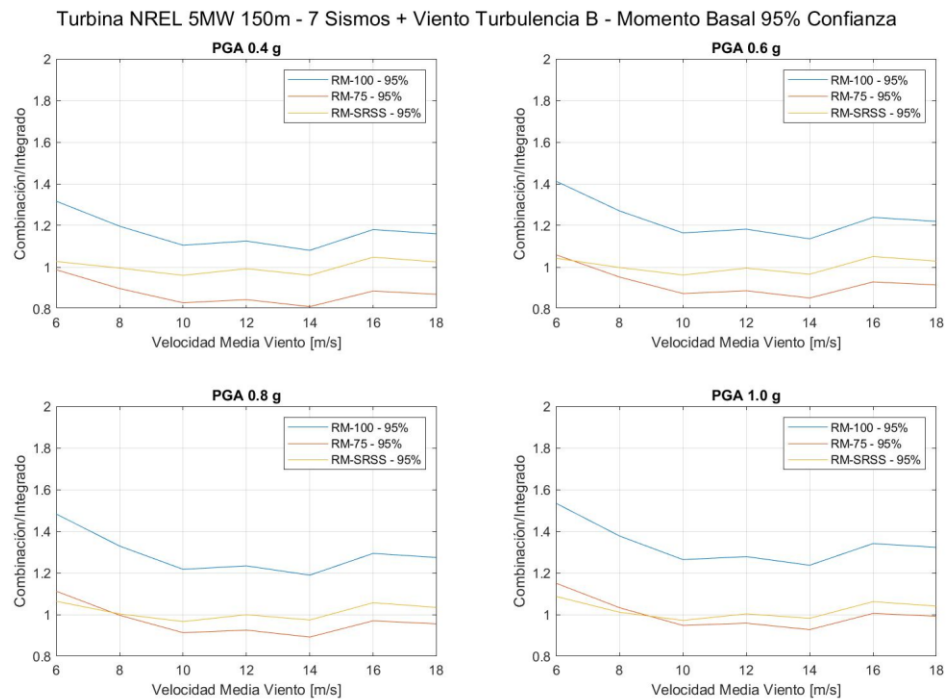


**Figura H.10 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel B**

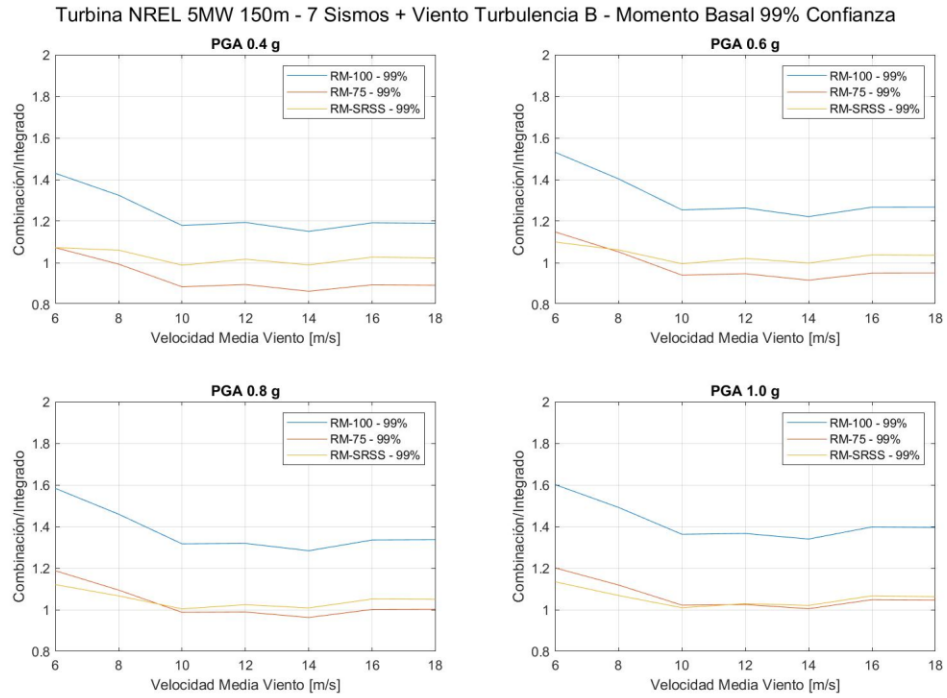




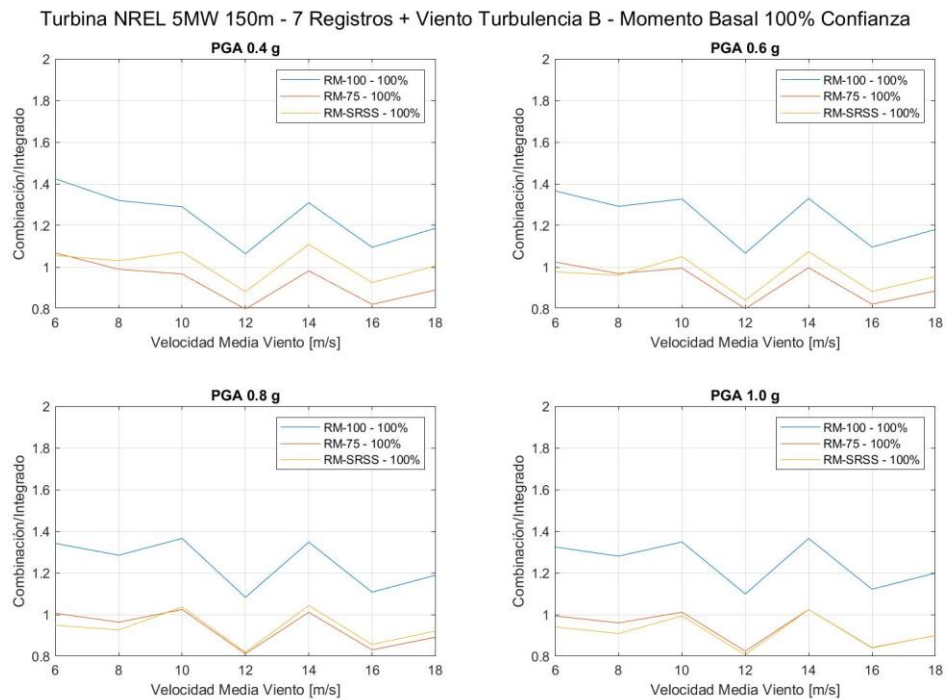
**Figura H.13 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel B**



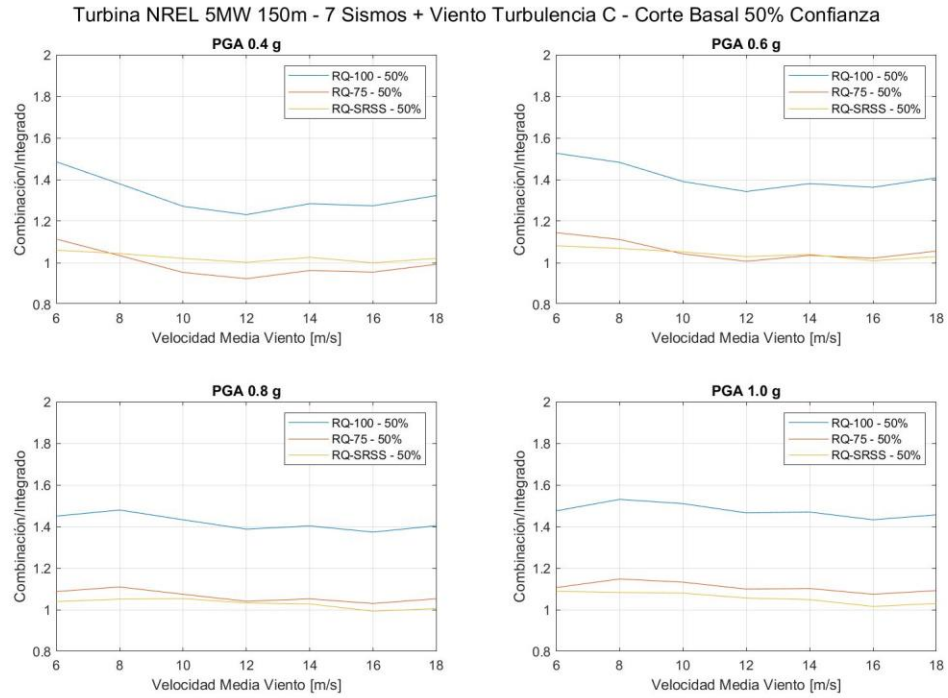
**Figura H.14 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel B**



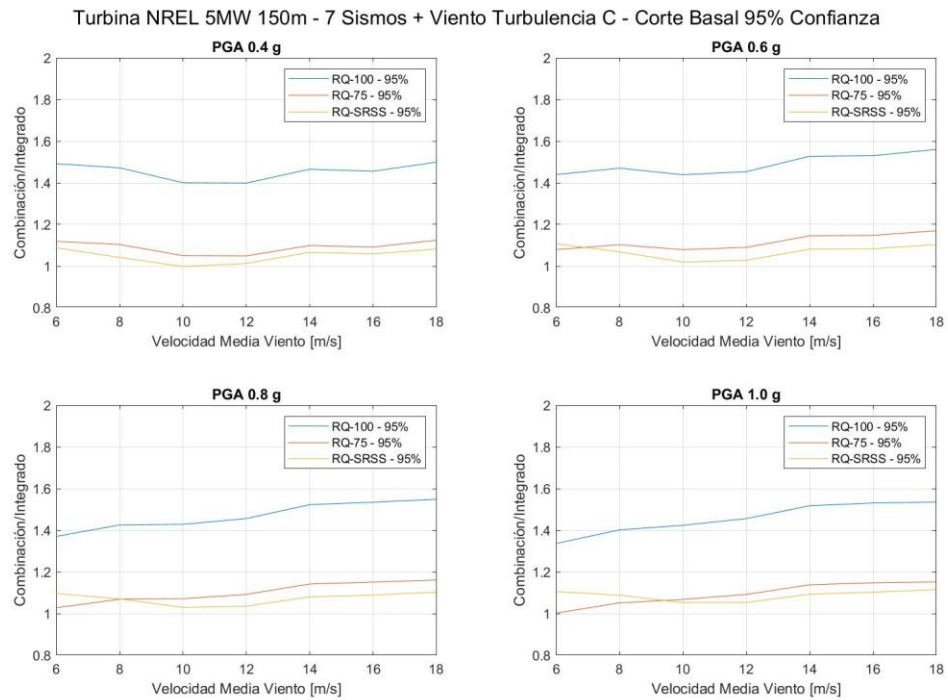
**Figura H.15 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel B**



**Figura A.16 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel B**

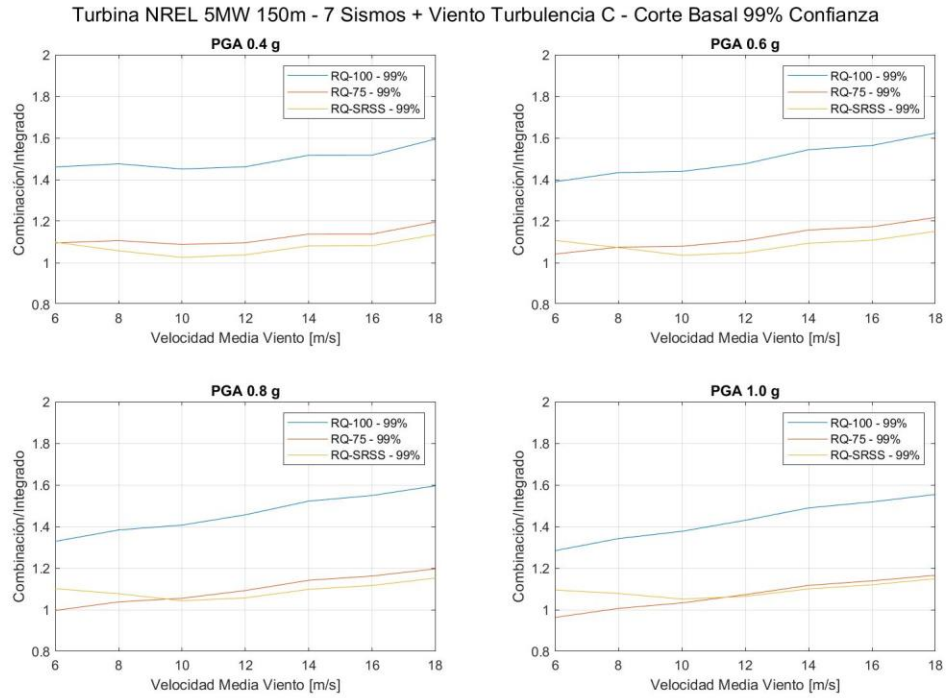


**Figura H.17 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**

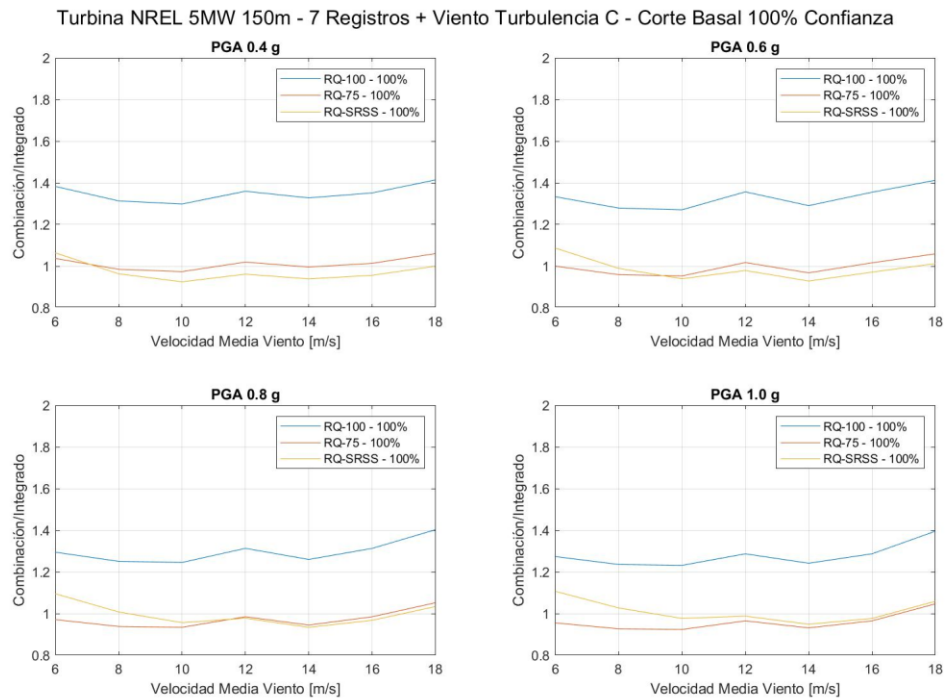


**Figura H.18 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**

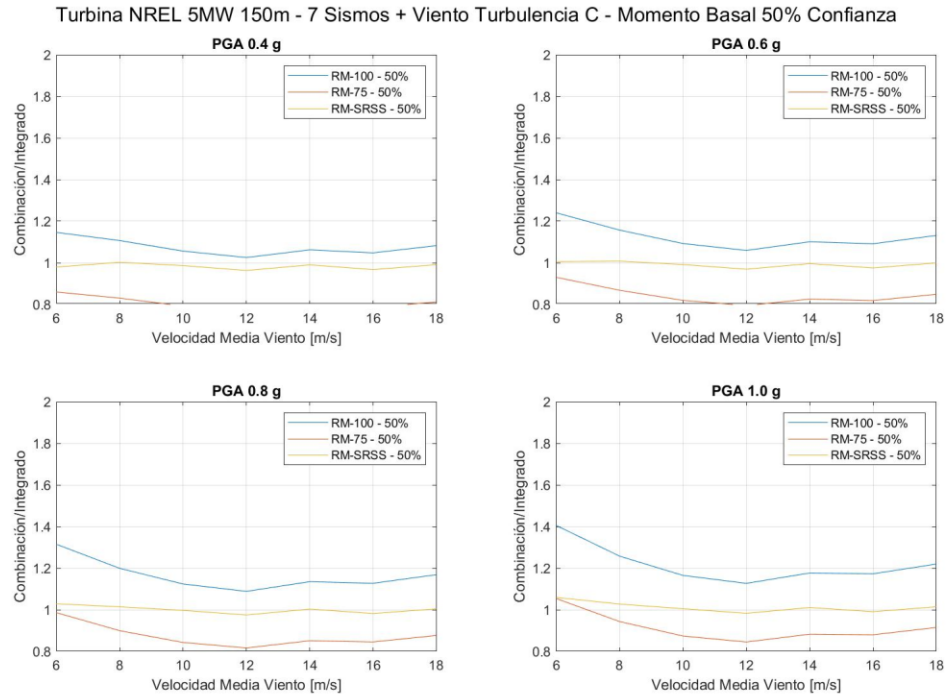




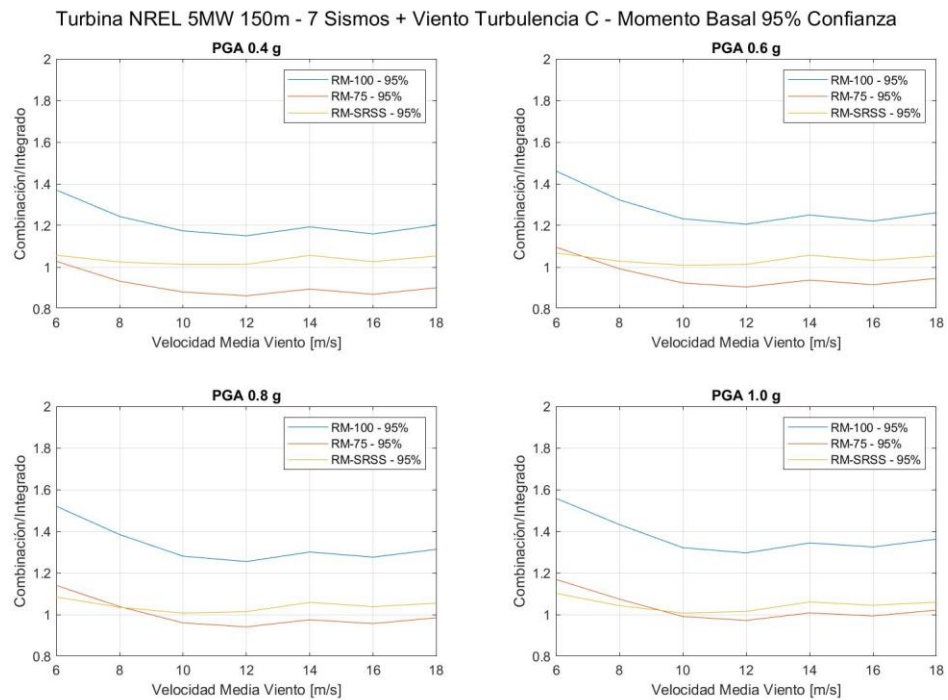
**Figura H.19 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 99% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura H.20 Resultados Torre 150 m - Corte Basal 100% Confianza - Turbulencia Nivel C**

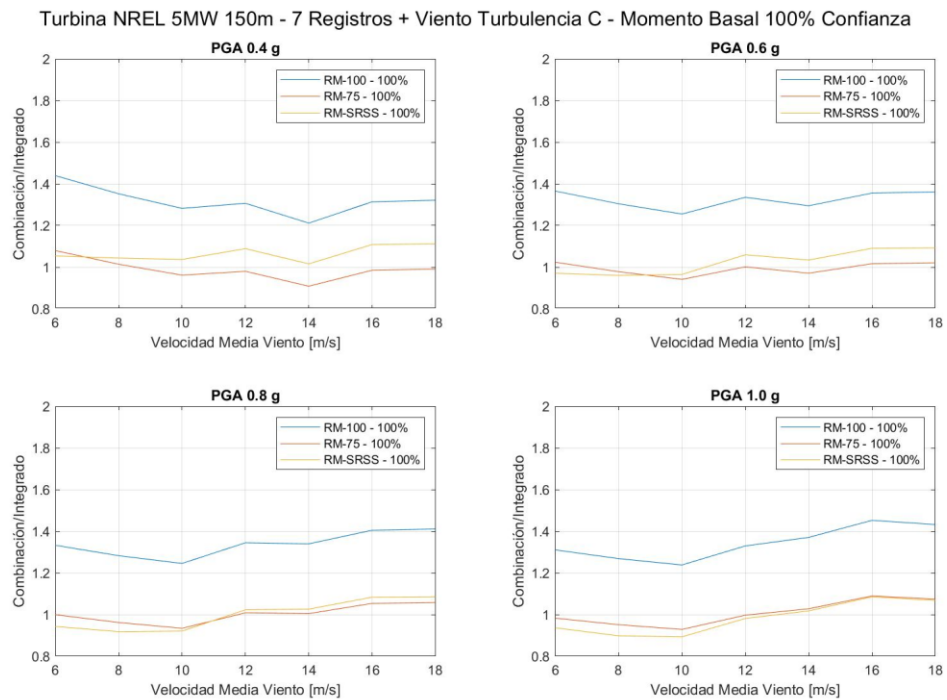
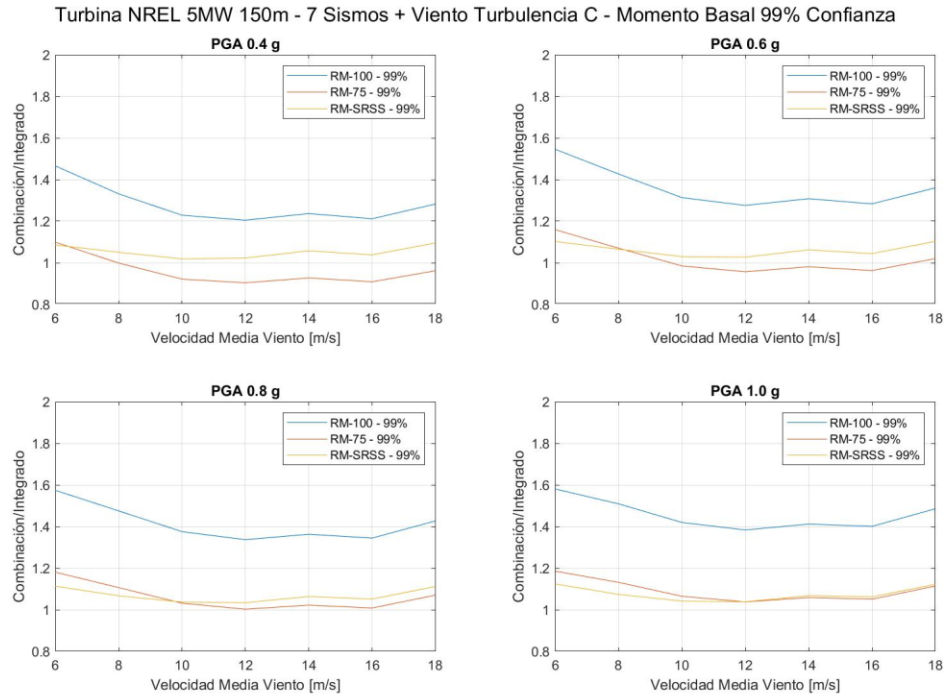


**Figura H.21 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 50% Confianza - Turbulencia Nivel C**



**Figura H.22 Resultados Torre 150 m - Momento Basal 95% Confianza - Turbulencia Nivel C**





# Anexo I

## Ejemplo Referencial Cálculo Espesores Manto Torre Aerogenerador

El presente anexo entrega un cálculo referencial para el cálculo de espesores de manto en una torre de aerogenerador, considerando valores aproximados de proyectos reales. Se evalúa de esa manera el impacto de utilizar las combinaciones de carga analizadas en esta tesis en el espesor resultante, el cual es proporcional al costo de la torre.

**Tabla I.1 Ejemplo Cálculo Espesores de Manto Torre Soporte Aerogenerador – Solicitaciones Basales**

<b>Solicitud</b>	<b>Axial kN</b>	<b>Corte kN</b>	<b>Momento kN-m</b>
Peso Propio (D)	3.000	0	950
Carga Operacional (O)	0	550	37.000
Sismo (E)	0	450	21.000

Considerando las solicitaciones antes mencionadas, se calcula el espesor resultante conforme a los requisitos de pandeo requeridos por Eurocódigo [27], considerando un factor de utilización de 1,00 para un acero de tensión de fluencia 315 kN/mm<sup>2</sup> (valor típico de aceros utilizados en la fabricación de torres de aerogeneradores). Se tienen los resultados mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla I.2 Ejemplo Cálculo Espesores de Manto Torre Soporte Aerogenerador – Solicitaciones Basales**

<b>Combinación de Carga</b>	<b>Espesor mm</b>	<b>Variación %</b>
D + E + O	23,3	0,0
D + 0,75·E + 0,75·O	19,1	8,0
D + $\sqrt{E^2 + O^2}$	18,8	8,6

Se tiene por tanto que el uso de distintas combinaciones de carga puede implicar una diferencia de espesor (y proporcionalmente, de costo) del orden de 9% en la fabricación de la torre de soporte.