



AEROGENERADORES

Análisis de la Respuesta Sísmica para torres de Aerogeneradores en base a Proyecto de Norma NCh 2369 Cap. 14

Victor Figueroa D.

Ingeniero Civil Senior – Mainstream Renewable Power

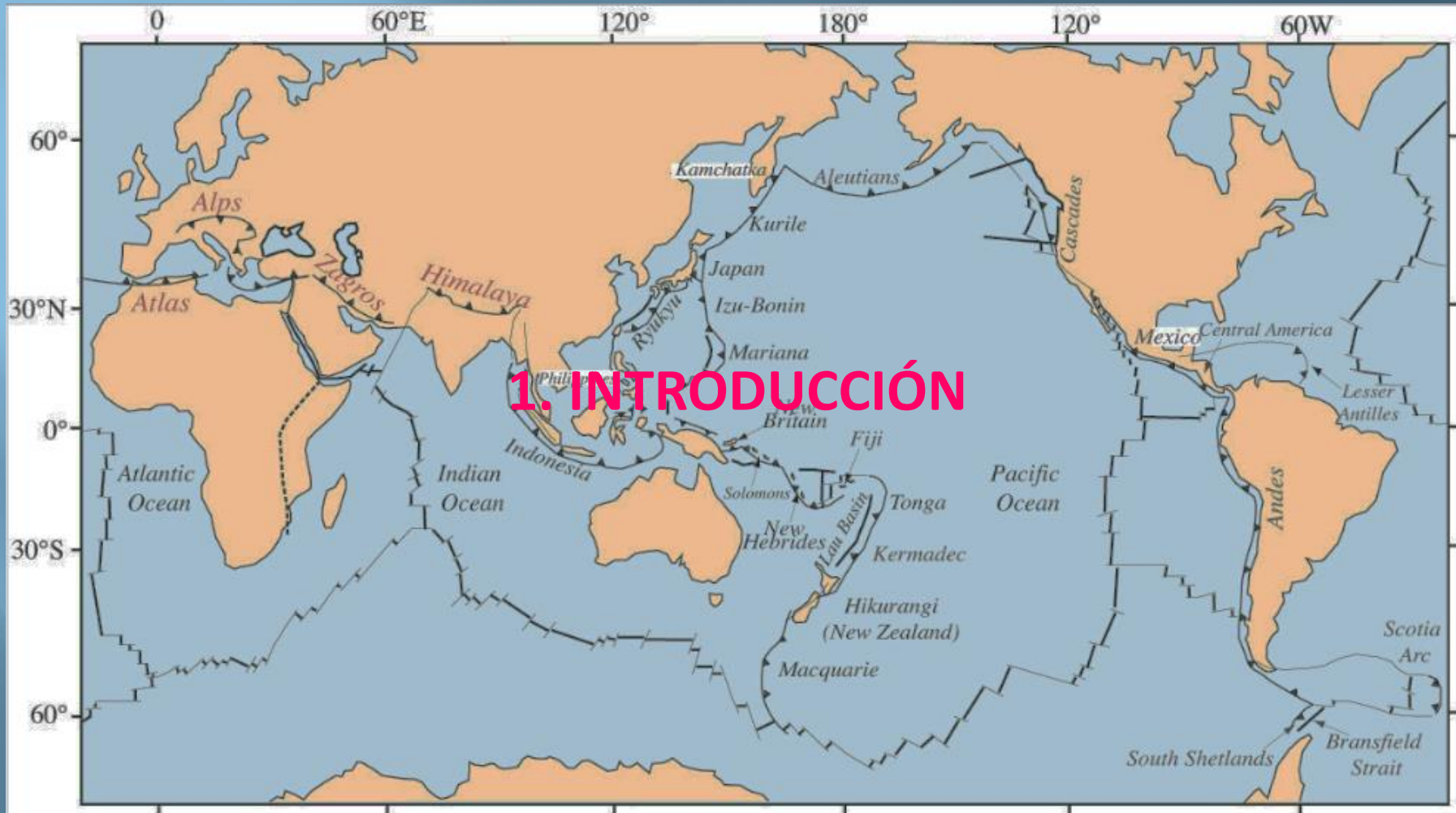
**Presentación basada en el trabajo de tesis del candidato a ingeniero civil de la UTFSM Sr.
Sebastián San Martín A.**

Marzo 2019

ESTRUCTURA DE LA PRESENTACIÓN



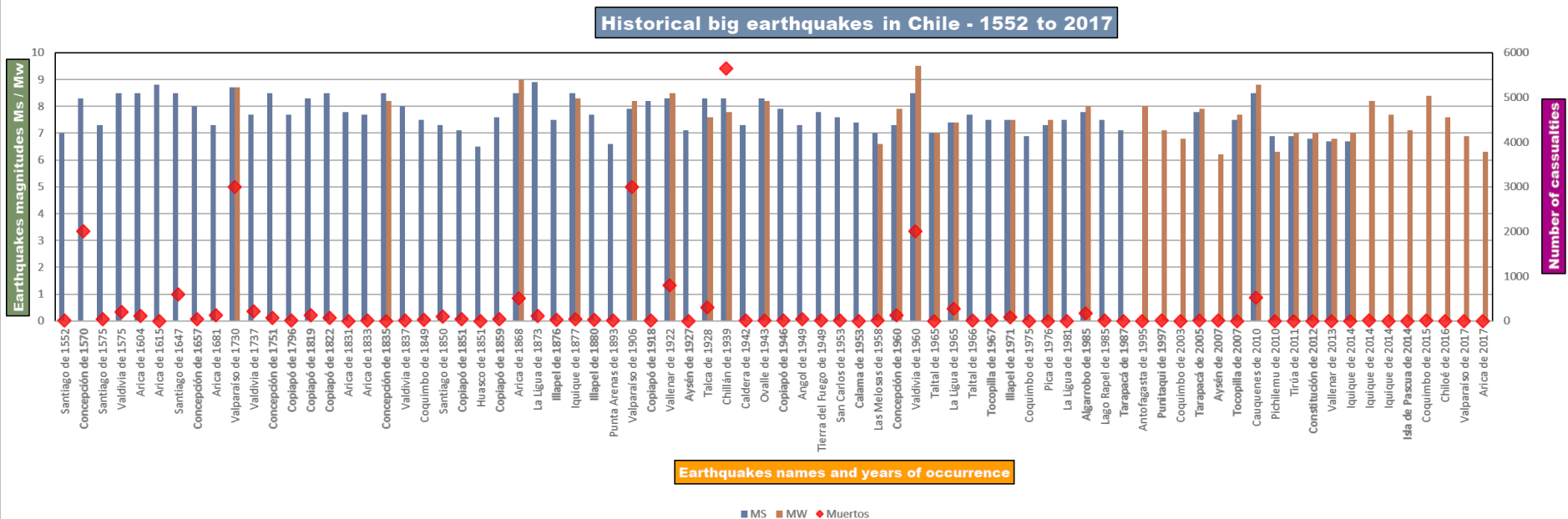
1. INTRODUCCIÓN
2. ESPECTROS DE DISEÑO
3. MODELACIÓN
4. RESULTADOS
5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES



INTRODUCCIÓN

MARCO HISTÓRICO DE TERREMOTOS EN CHILE

- Año de inicio de registro escrito de terremotos en Chile: 1552
- Años transcurridos a la fecha: 467
- Terremotos importantes con magnitud > 6 Ms a la fecha: ~76
- Tasa de recurrencia de eventos > 6 Ms en Chile: **1 cada 6 años**



INTRODUCCIÓN

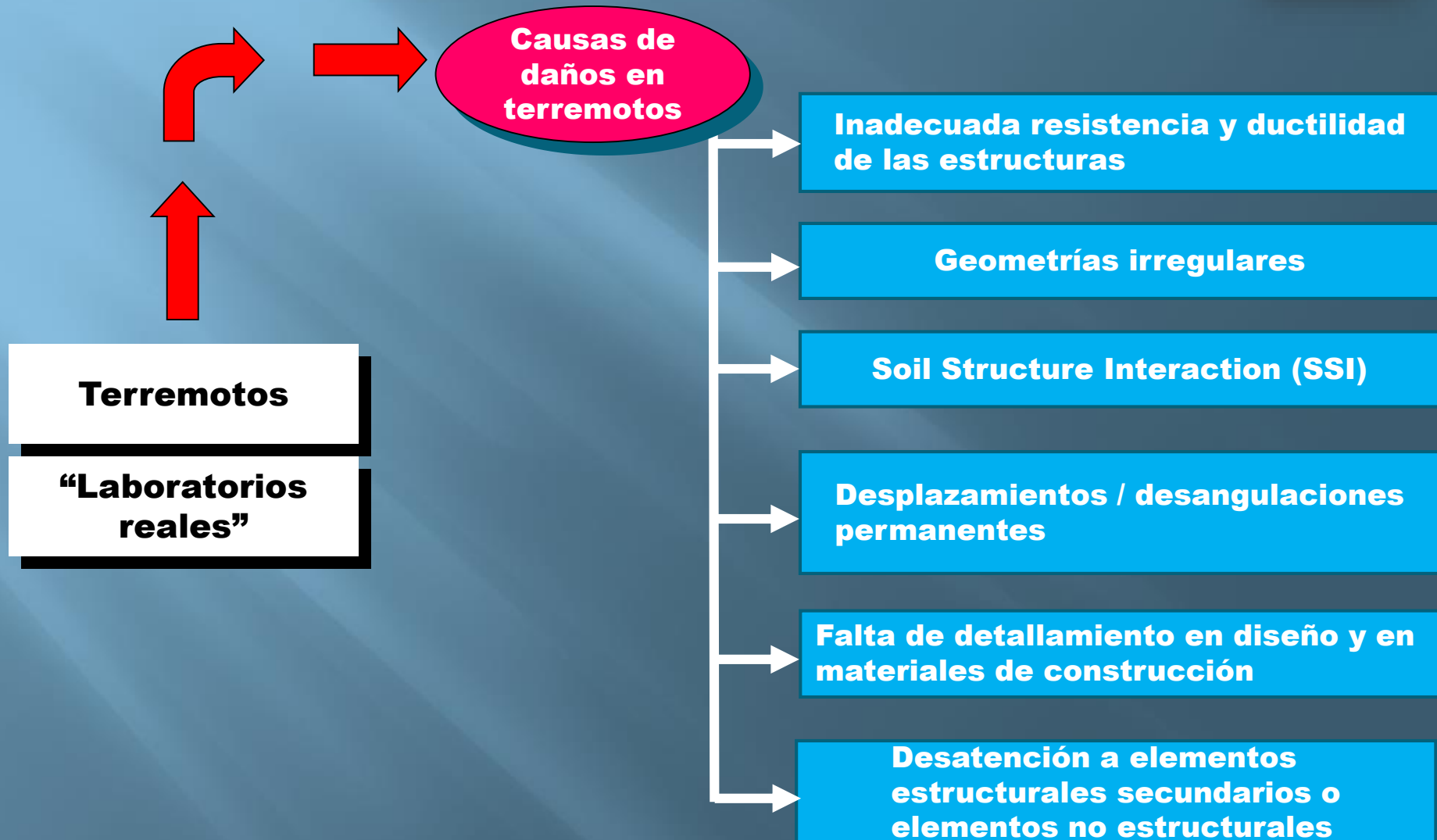


MARCO SECTOR INDUSTRIAL

- Los terremotos tienen las siguientes grandes consecuencias económicas a nivel de país:
 - Impacto en la deuda externa.
 - Impacto en el producto interior bruto.
 - Impacto en la tasa de crecimiento del país.
 - Impacto en nuevos proyectos e inversiones.
 - Impacto en el gasto público.
 - Impacto en la mano de obra empleo / desempleo.
 - **Impacto en estructuras y obras civiles.**
 - **Impacto en Capex y Opex de proyectos.**
 - **Impacto en víctimas y trabajo continuo de instalaciones críticas.**
- En relación con los tres últimos impactos enumerados, Chile ha mejorado desde los años posteriores a los grandes terremotos de Valparaíso 1906 (la creación del servicio sismológico), Chillán 1939, Valdivia 1960 (generación de la ONEMI), Algarrobo 1985 (la generación de la ETG de Endesa) y Cauquenes 2010 (re-análisis de los estándares sísmicos NCh) realizando esfuerzos técnicos para definir estándares sísmicos y disposiciones para garantizar la protección de la vida, el no colapso de las estructuras y el trabajo continuo de instalaciones críticas minimizando los riesgos sociales y económicos.
- Tendencia en el mercado eólico mundial de construir aerogeneradores cada vez más potentes, de manera de contar con mayores capacidades de generación. El incremento de la potencia trae consigo el aumento del diámetro del rotor, la necesidad de mayor altura de buje (HH) y por ende mayor capacidad de la torre soportante, fundaciones y conexiones.

INTRODUCCIÓN

MARCO DE DAÑOS EN TERREMOTOS



INTRODUCCIÓN



MARCO REGULATORIO EN CHILE

- Durante muchos años, las bases para conseguir un adecuado comportamiento sísmico de los sistemas y estructuras relacionados a la generación, transmisión y distribución eléctrica no han estado amparados bajo una normativa oficial en Chile.
- Las ETG 1020 (1997) y ETG 1015 (1987) de Endesa (actualmente Enel) han sido los documentos que históricamente se han utilizado para la obtención de cargas inerciales debidas a un sismo en la base de una estructura soportante de sistemas de generación y transmisión eléctrica.
- Dicho buen comportamiento histórico ha sido recogido en nuestra Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTS y CS) de la Comisión Nacional de Energía (CNE) que explicita los requerimientos mínimos de Seguridad y Calidad de Servicio que deben ser cumplidos por las instalaciones de los sistemas interconectados, todo esto amparado en nuestra Ley General de Servicios Eléctricos (conocida también como Código Eléctrico).

CAPÍTULO Nº 3 : Exigencias Mínimas para Diseño de Instalaciones

TÍTULO 3-2 EXIGENCIAS GENERALES

Artículo 3-3

Las instalaciones de unidades generadoras que operen interconectadas a un SI y las instalaciones del ST deberán cumplir con las siguientes exigencias mínimas y condiciones básicas:

- a) El diseño, fabricación, ensayos e instalación se realizará de acuerdo a las normas nacionales aplicables. Cuando las referidas normas nacionales específicas no existan, se aplicarán normas internacionales emitidas por organismos tales como: la International Electrotechnical Commission (IEC); la Conférence Consultative International des Télégraphes et Télécommunications (CCITT); la International Organization for Standardization (ISO); las normas DIN/VDE; la American Society of Testing Materials / American National Standards Institute (ASTM/ANSI); el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); American Society of Civil Engineers (ASCE); Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE). Para asegurar la calidad sísmica, en el diseño se aplicarán las normas chilenas. Donde no existe norma chilena se deberá usar la especificación técnica ETG-1020 de ENDESA, o la IEEE Std 683-2005 en la condición de "High Seismic Level" con "Projected performance" de factor 2,0 para los materiales frágiles como la porcelana y/o las aleaciones de aluminio.

Los materiales frágiles deberán tener demostración experimental objetiva de su resistencia mínima estadística de ruptura (valor medio menos 2 veces la desviación estándar).

Para las instalaciones existentes a la fecha de vigencia de la presente NT, también serán aplicables las normas sísmicas utilizadas en sus respectivos diseños, tales como las especificaciones técnicas ETG-A.0.20 y ETG-A.0.21 de Transelec, ETG-1013, ETG-1015 o ETG-1020 de ENDESA.

Toda instalación o equipo de alta tensión deberá contar con los antecedentes de calificación sísmica conforme a las publicaciones indicadas considerando las condiciones propias de la instalación de alta tensión incluyendo tanto la fundación, estructura soporte y equipo de alta tensión propiamente tal. También deberá considerar los requisitos que se indican en los siguientes párrafos:

- I. Para las subestaciones convencionales y las subestaciones compactas se deberá considerar conexiones aéreas flexibles con holguras que eviten que se generen fuerzas hacia los equipos. El conjunto de equipos de alta tensión y estructura de soporte deberá tener un comportamiento rígido, para lo cual deberá verificarse que la frecuencia del conjunto sea mayor a 30 [Hz] o mayor a cuatro veces la frecuencia natural del equipo propiamente tal (se debe cumplir con el menor valor).

Los bushing de alta tensión de los transformadores y reactores de poder deberán ser considerados en el cálculo con un factor de estructura no menor a $k=1.5$. Bushing tipo "central clamp" (unión porcelana flanges por presión de resorte) no deben usarse en tensiones nominales iguales o superiores a 220 [kV].
- II. Para las subestaciones aisladas en gas SF₆ (GIS) aplican las mismas publicaciones antes mencionadas. La calificación sísmica de estas

INTRODUCCIÓN



MARCO DEL ANÁLISIS - METODOLOGÍA

- Esta presentación busca analizar las principales diferencias que exhibe el proyecto de norma NCh 2369 en contraposición con la práctica actual enmarcada en la ETG-1020 de Endesa (hoy Enel) y que pudieran afectar de manera directa a los parques eólicos. Se ha tomado como base de comparación el **parque eólico Sarco** de Aela Energía (en cuya propiedad participa Mainstream).
- Han quedado excluidas de esta presentación el análisis de las combinaciones de cargas por requerir un trato y discusión más extensos, así como también los efectos de roce en la interacción suelo estructura (SSI) y las verificaciones de resonancia por sismo y operación.
- Se ha realizado la comparación de la respuesta sísmica mediante modelación numérica de elementos finitos con base en método de superposición modal espectral considerando un aerogenerador con fundación gravitacional expuesta a SSI (proyecto de norma NCh 2369) versus modelos que no consideran dicha interacción o la consideran de una manera simplificada (ETG 1020 y práctica actual). Las propiedades del aerogenerador emulan a un modelo 3.4 MW y diámetro de rotor de 114 m, con altura de buje (Hub Height) de 93 m producida por Senvion. La turbina eólica ha sido discretizada utilizando el programa de análisis estructural Robot Structural Analysis y la respuesta ha sido analizada en términos de desplazamientos, esfuerzos internos de la torre soportante, además de corte y de momento en la base de esta.

INTRODUCCIÓN

MARCO DEL ANÁLISIS – PARQUE EÓLICO SARCO

- El Proyecto Eólico Sarco estará ubicado en la comuna de Freirina, aproximadamente a 70 kilómetros al suroeste de la ciudad de Vallenar, en la Región de Atacama (III Región).



INTRODUCCIÓN

MARCO DEL ANÁLISIS – PARQUE EÓLICO SARCO

- El parque eólico está emplazado en un terreno de 2.680 hectáreas y cuenta con 50 aerogeneradores de potencia 3.4 (MW) y una altura de buje (Hub Height) de 93 (m) que sumarán una capacidad de generación máxima de 170 (MW), equivalentes al consumo de energía de unos 260 mil hogares.
- El proyecto también consideró la construcción de una subestación elevadora de tensión y una línea de transmisión de 73 km de largo, en un circuito de 220 (kV), que transportará la energía desde el parque eólico hasta la subestación Maitencillo, lugar donde es inyectada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).



2. ESPECTROS DE DISEÑO Y ESTRUCTURA DEL SISTEMA

ESPECTROS DE DISEÑO

En ambos documentos, ETG 1020 y PN NCh 2369 Cap. 14, la filosofía de diseño de las considera la necesidad de cumplir con el objetivo de continuidad de operación de las instalaciones después de ocurrido el sismo de diseño, requerimiento que se mantiene hace más de 20 años. Esta necesidad se controla a través de los parámetros definitorios de los espectros de diseño, de manera que dichos parámetros conllevan implícitos requisitos mínimos de resistencia, de límites de deformaciones y de desplazamientos que deben poder garantizar la pronta recuperación de la operación del sistema en base, todos estos basados en la experiencia y buen comportamiento durante eventos sísmicos de gran envergadura en los últimos 40 años en nuestro país.

Categoría Sísmica		ETG 1020	PN NCh 2369 Cap. 14
Categoría	A	<ul style="list-style-type: none"> *Operatividad esencial durante y después de un sismo. *Riesgo de muerte. *Pérdidas económicas considerablemente altas. 	<ul style="list-style-type: none"> *Sistemas que no pueden dejar de operar incluso durante la ocurrencia del sismo. *Estructuras y equipos no deben presentar daños.
	B	<ul style="list-style-type: none"> *Necesarios para la operación normal y continuada. *Afecten el funcionamiento de estructuras de la Categoría A. 	<ul style="list-style-type: none"> *Necesarios para la operación de la planta. *Estructuras pueden presentar daños menores. *Equipos no deben presentar daños.
	C	<ul style="list-style-type: none"> *Falla no acarrea mal funcionamiento de las Categorías A y/o B. *No son indispensables para el funcionamiento continuado del conjunto al que pertenecen. 	<ul style="list-style-type: none"> *No son necesarios para el inicio de la operación normal de la central. *Los equipos y estructuras pueden presentar daños menores con el sismo.
	D	n/a	<ul style="list-style-type: none"> *No forman parte del proceso de operación de la central. Su diseño no queda condicionado el capítulo 14.

ESPECTROS DE DISEÑO

	Documento	ETG 1020			PN NCh 2369 Cap. 14		
	Parámetro	I_E (*)	PGA (a_0)	FRE (**)	I_E (*)	PGA (a_0)	FRE (**)
Categoría	A	1	0.5	n/a	1.2	n/a	n/a
	B	0.8	0.4		1		
	C	0.6	0.3		0.8		
Zona Sísmica	Zona 1	n/a	n/a	n/a	n/a	0.5	n/a
	Zona 2					0.4	
	Zona 3					0.3	
Tipo de Suelo	Tipo I	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.8
	Tipo II						1
	Tipo III						1
	Tipo IV						1

(*) Factor de importancia de la estructura
(**) Factor de reducción de espectro

	ETG 1020	PN NCh 2369 Cap. 14
Damping	0.5-20%, dependiendo de las características del material y la estructura.	1% Aerogenerador detenido. 5% Aerogenerador en producción.

	ETG 1020	PN NCh 2369 Cap. 14 (Tabla 14.4)
1	Estructuras diseñadas para permanecer elásticas.	Conexión Torre - Fundación no dúctil
2	n/a	Conexión Torre - Fundación dúctil
3	Péndulo invertido, 50%+ de la masa se halla concentrada en el extremo superior, y que tenga un único elemento resistente a las fuerzas horizontales en la dirección de análisis.	n/a

El desarrollo anterior de las ETG, así como el desarrollo del PN NCh 2369 Cap. 14 enfocan su visión en que el comportamiento sísmico de los equipos mecánicos y eléctricos correspondientes a las centrales de generación y a las instalaciones del sistema de transmisión es dependiente del comportamiento sísmico de las estructuras y fundaciones que los soportan. Dicho desarrollo se ajustó a las estructuras relevantes y dominantes de sus respectivas épocas, dejando de lado las centrales hidroeléctricas de embalse y centrales nucleares, cuyos diseños siguen estrictas normas internacionales.

ESPECTROS DE DISEÑO

Natural Period Valid Range	ETG 1.020	NCh 2369 (cap. 14)
$0 \leq T < T_1$	$I_E \left(a_0 \left(1 - \frac{T}{T_1} \right) + \frac{T}{T_1} \frac{A(\xi)}{R} \right)$	$I_E \left(a_0 \left(1 - \frac{T}{T_1} \right) + \frac{T}{T_1} \frac{A(\xi)}{R} \right)$
$T_1 \leq T < T_2$	$I_E \frac{A(\xi)}{R}$	$I_E \frac{A(\xi)}{R}$
$T_2 \leq T < T_3$	$I_E \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{A(\xi)}{R}$	$I_E \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{A(\xi)}{R}$
$T \geq T_3$	$I_E \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{A(\xi)}{R}$	$I_E \left(\frac{T_3}{T} \right)^2 \frac{A_1(\xi)}{R}$

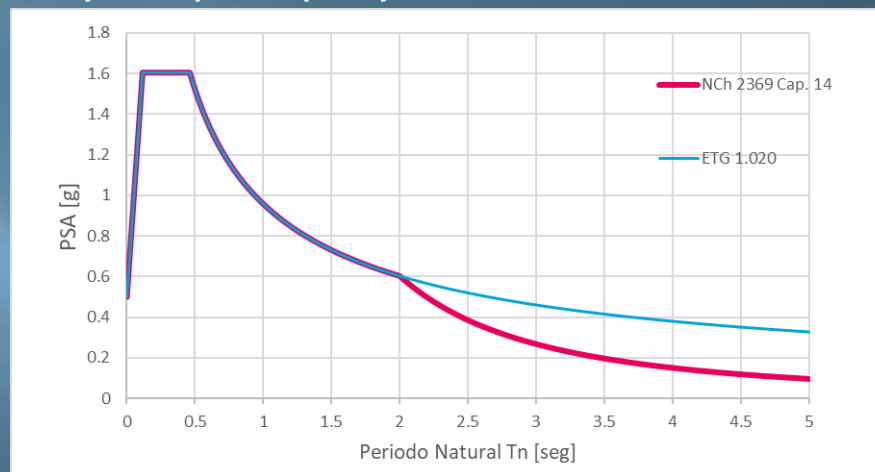
Los tres primeros segmentos de ambos pseudo-espectros tienen la misma forma, un primer brazo lineal, seguido de una meseta de aceleración constante y un tercer brazo de disminución hiperbólica. Incluso los valores T_1, T_2 y $\frac{A(\xi)}{g}$ son idénticos para el mismo valor de amortiguamiento.

Sin embargo, para periodos naturales T iguales o mayores a T_3 (con $T_3 = 2$ [seg] para todó amortiguamiento ξ), el espectro de diseño de la NCh 2369 cap. 14 incursiona en un brazo cuadrático asintótico decreciente, a diferencia de la ETG 1.020 – cuyo espectro no fue generado para considerar estructuras con periodos mayores a 2 [seg]–.

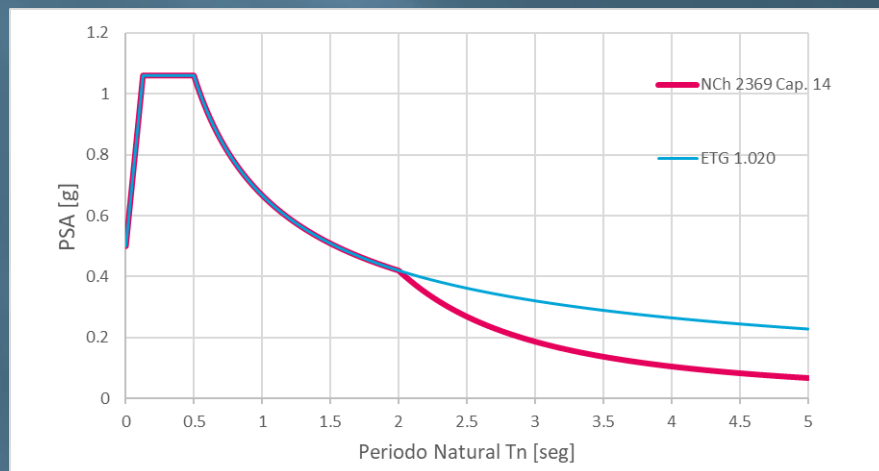
ESPECTROS DE DISEÑO

Espectros para amortiguamiento 1% y 5% para proyecto Sarco

Parámetro	NCh 2369	ETG 1020
Categoría	B	A
Factor de Importancia	1	1
Damping	1%	1%
Zona Sísmica	Zona 3	N/A
Tipo de Suelo	Tipo II	N/A
Factor de Modificación	1	1

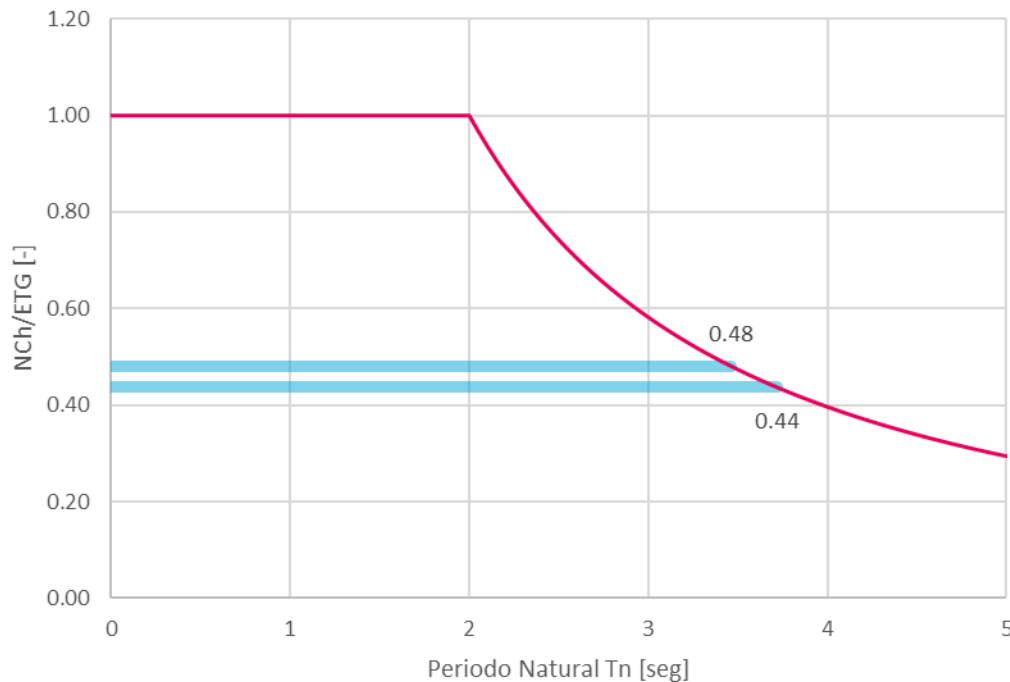


Parámetro	NCh 2369	ETG 1020
Categoría	B	A
Factor de Importancia	1	1
Damping	5%	5%
Zona Sísmica	Zona 3	N/A
Tipo de Suelo	Tipo II	N/A
Factor de Modificación	1	1



ESPECTROS DE DISEÑO

Ordenada espectral Nch 2369 normalizada por espectro ETG 1020 -
Caso Aerogenerador para Suelo Tipo II y Categoría B



- Es fácilmente identificable que para estructuras con periodo fundamental por sobre los 2 seg, la demanda sísmica arrojada por la ordenada espectral del anteproyecto NCh 2369 comienza a decrecer de forma considerable.
- Como veremos más adelante, para el caso de estudio con $T_n = 3.5 - 3.7 [seg]$, esta disminución es del orden del 47% respecto al espectro ETG.

3. MODELACIÓN

MODELACIÓN – TIPO DE ELEMENTO



PN NCH 2369 CAP. 14

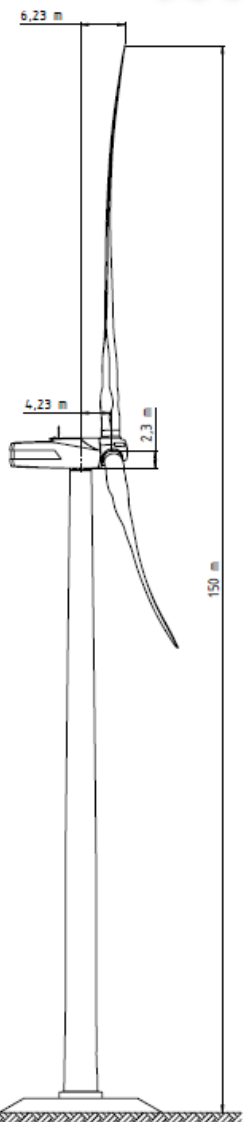
- ▣ Elementos “Shell” son obligatorios.
- ▣ Integración del sistema completo Nacelle + Torre + Fundación, con interacción suelo-estructura.
- ▣ Número de elementos: ~5000
- ▣ Ecuaciones del sistema: ~ 22000
- ▣ Permite conocer distribución de esfuerzos en el manto.

ETG 1020

- ▣ Elementos “Frame” suficientes para el análisis.
- ▣ No es requerimiento la incorporación de SSI en el análisis.
- ▣ Número de elementos: 40
- ▣ Ecuaciones del sistema: 120
- ▣ Solo se presentan esfuerzos máximos.
- ▣ Resultados levemente mayores que análisis con *Shells*.

El modelo “Tipo Shell” incluye el aerogenerador, fundación y suelo. Mientras que la torre tubular ha sido modelada con elementos tipo *Shell*, la góndola (o nacelle) y la fundación han sido incluidas como elementos volumétricos. El SSI se ha representado utilizando resortes nodales en la fundación cuyas propiedades dependen de las características del suelo de cimentación.

MODELACIÓN – MODELOS



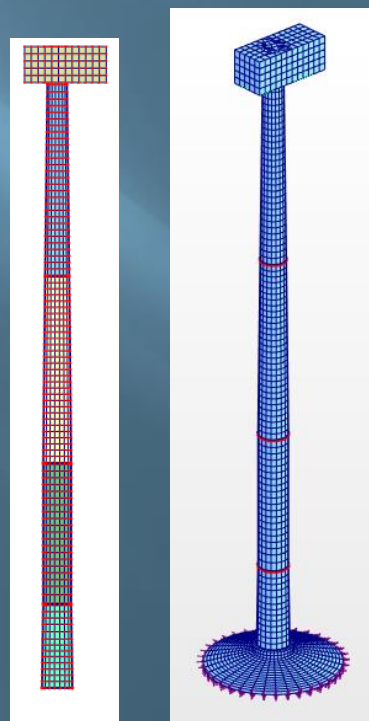
Planos TSA
(Senvion)

Marzo 2019

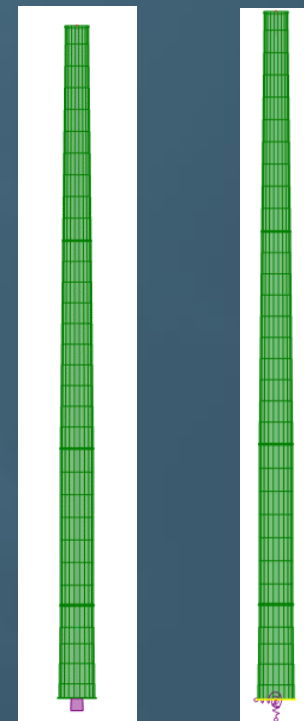
Propiedad	Valor
Potencia Nominal	3.4 MW
Diámetro de Rotor	114 m
Altura de Torre	87.8 m
Diámetro Sección Inferior	4.7 m
Diámetro Sección Superior	3.0 m
Espesor Manto de Torre	38 - 17 mm
HH Rotor	93 m
Masa de la Torre	220.0 ton
Masa Nacelle+Rotor +Blades	184.3 ton

PN NCH 2369 CAP. 14

ETG 1020



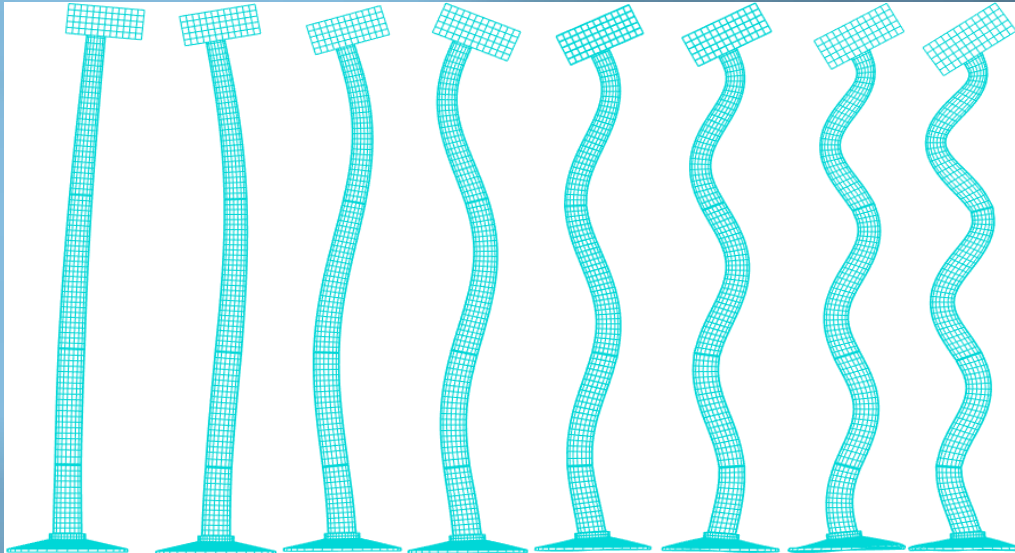
Modelos *Shell Empotrado*
y *Shell + Fund + SSI*



Modelos *Frame, Empotrado*
y *Frame + SSI*

MODELACIÓN - EIGENSHAPES

SHELL + SSI (PN NCH 2369 CAP. 14)

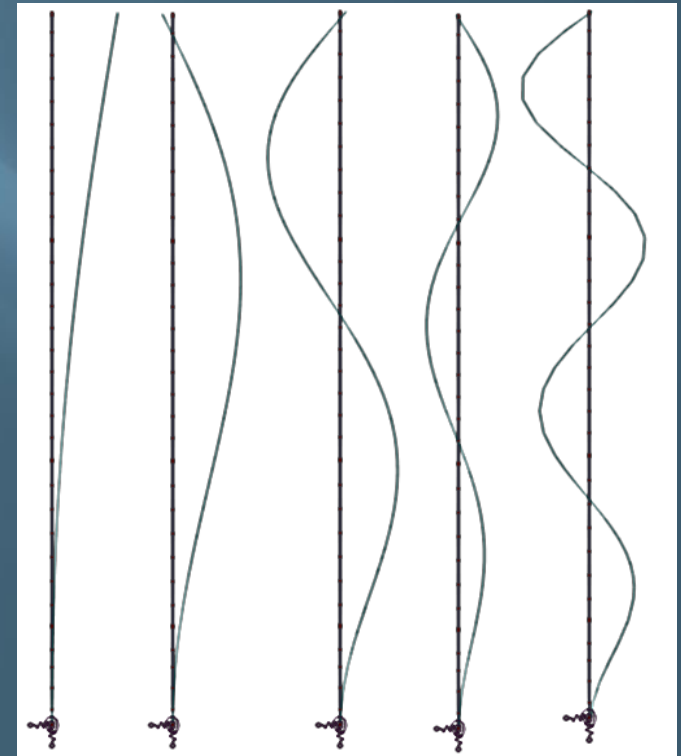


- De 40 modos corridos por dirección, 8 activan masa sumando 90%+ de masa para el sistema completo (aunque aún debajo del 95% del PN NCh 2369).

Modelo	Modos Requeridos	Modos significativos
Frame	5	5
Shell	~15	5
Shell + Fund	~40	8

FRAME (ETG 1020)

- Primeros 5 modos de vibrar para modelo simplificado → 90%+ de masa participante (aunque aún debajo del 95% del PN NCh 2369).



4. RESULTADOS

RESULTADOS – ANÁLISIS DINÁMICO

Periodo Natural (seg)					
	Frame Model		Shell Model		
Mode	Fixed	Spring	Pinned	Fixed	Spring
Modo 1	3.46	3.46	3.63	3.63	3.72
Modo 2	0.38	0.38	0.41	0.41	0.43
Modo 3	0.13	0.13	0.15	0.15	0.16
Modo 4	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08
Modo 5	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
Modo 6					0.04
Modo 7					0.03
Modo 8					0.03

- Periodos naturales menores para estructura simplificada:
→ Mayor coeficiente espectral (para el rango de interés).
- Estructuras más flexibles con elementos Shell y resortes nodales en la fundación.

Masa Modal (t)					
	Frame Model		Shell Model		
Mode	Fixed	Spring	Pinned	Fixed	Spring
Modo 1	215.9	215.9	191.6	191.6	192.7
Modo 2	72.2	72.2	74.0	74.0	77.1
Modo 3	65.5	65.6	69.7	69.7	72.0
Modo 4	56.6	56.9	65.6	65.6	67.8
Modo 5	60.2	60.5	65.1	65.1	64.8
Modo 6					54.5
Modo 7					105.6
Modo 8					72.9

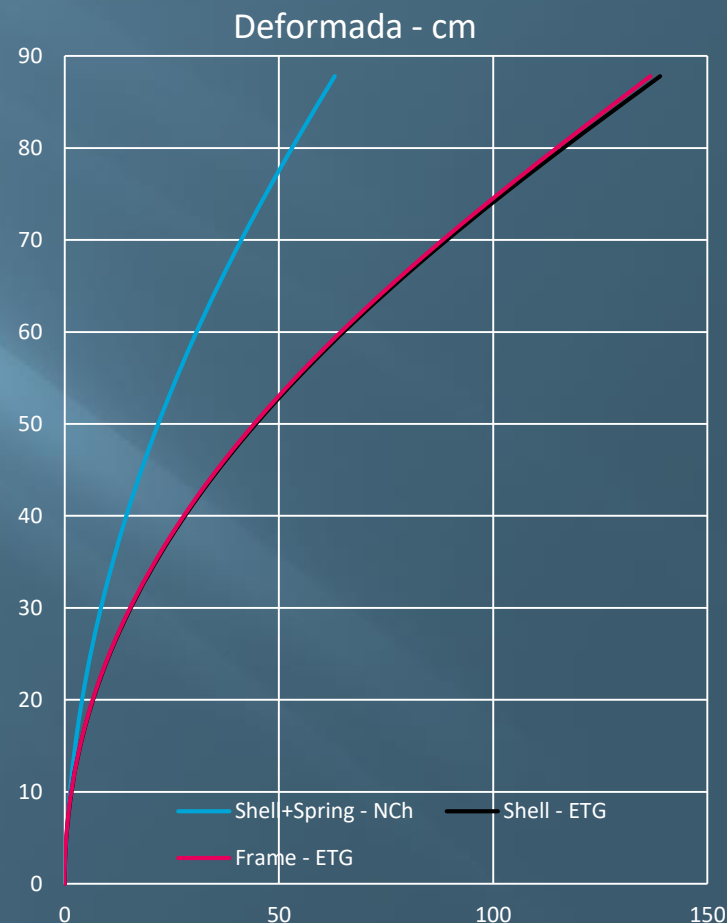
Masa Actual (%)					
	Frame Model		Shell Model		
Mode	Fixed	Spring	Pinned	Fixed	Spring
Modo 1	65.2	64.7	64.0	64.0	18.4
Modo 2	13.7	13.6	13.9	13.9	4.3
Modo 3	6.3	6.3	6.6	6.6	2.2
Modo 4	3.4	3.6	3.7	3.7	1.6
Modo 5	2.4	2.6	2.8	2.8	1.8
Modo 6					3.3
Modo 7					38.6
Modo 8					22.2
Total	91.1	90.8	90.9	90.9	92.4

RESULTADOS - DESPLAZAMIENTOS

	ETG 1.015		NCh 2369	
	Frame	Shell	Shell + Spring	
Desp Máx	137	139	63	cm

	Frame	Shell
NCh/ETG	0.46	0.45

- ▣ Aerogenerador detenido, $R=1$.
- ▣ Deformada superpuesta (CQC) $\approx 1^\circ$ modo de vibrar.
- ▣ Desplazamientos al tope con espectro NCh 2369 disminuyen considerablemente.



RESULTADOS – FUERZAS INTERNAS

	ETG 1.015		NCh 2369	
	Frame	Shell	Shell + Spring	
Corte basal	148	146	112	tf
Momento Basal	9400.0	9300	4000.0	tf m

	Frame	Shell
NCh/ETG	0.76	0.77
NCh/ETG	0.43	0.43

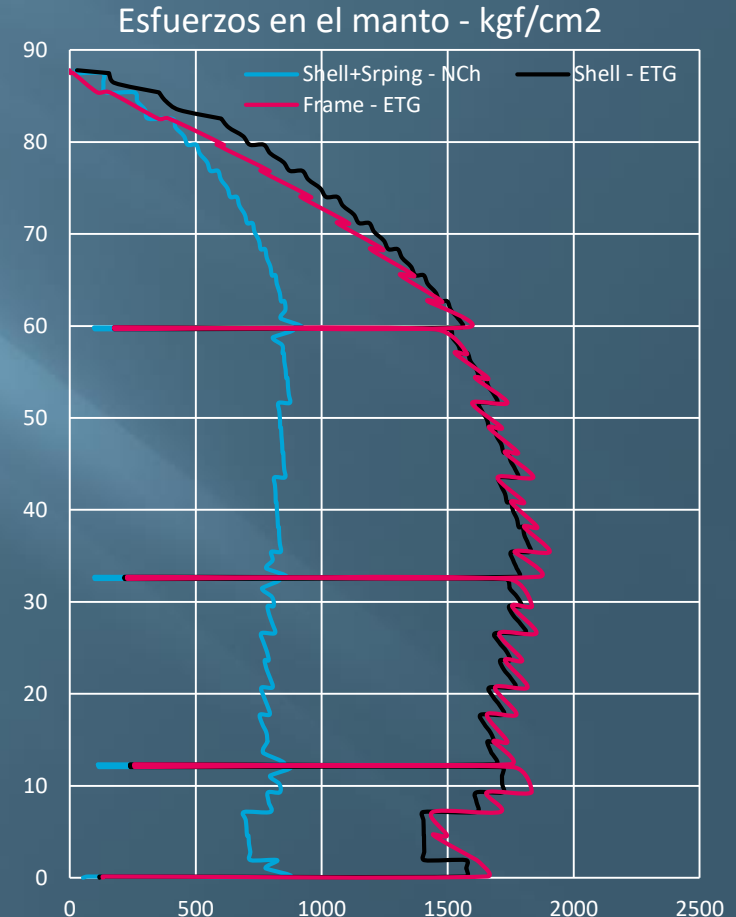
- ▣ Aerogenerador detenido, $R=1$.
- ▣ Momento basal calculado con espectro NCh bordea el 43% de la solicitud obtenida con ETG 1.015.
- ▣ Reducción del corte basal calculado con espectro NCh es de menor orden.

RESULTADOS – ESFUERZOS MÁXIMOS EN EL MANTO

	ETG 1.015		NCh 2369	
	Frame	Shell	Shell + Spring	
Esfuerzo Máx	1900.0	1800.0	900.0	kgf/cm2

	Frame	Shell
NCh/ETG	0.47	0.50

- Aerogenerador detenido, R=1.
- Perfil de esfuerzos máximos muy similar entre “Frame” y “Shell”
- Esfuerzos en el manto con espectro NCh 2369 disminuyen considerablemente.



5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- Poseemos actualmente la Ley General de Servicios Eléctricos y su Norma Técnica asociada (NTS y CS del 2018) que nos mueven a cumplir con requerimientos mínimos de Seguridad y Calidad de Servicio para instalaciones de sistemas interconectados, la cual solicita seguir la normativa atingente y en su ausencia, indica las ETG 1020 / ETG 1015 desarrolladas por Endesa.
- Al comparar la Metodología de Modelación, en este estudio, se ha observado que la inclusión de la fundación gravitacional y su respectiva interacción con el suelo tiende a flexibilizar el sistema completo con respecto al mismo sistema con apoyos rotulados o empotrados en los nodos basales (aumento de periodos naturales de cada modo), por lo que la respuesta sísmica (esfuerzos, cortes y momentos) disminuye.
- Las mayores solicitaciones fueron obtenidas con el modelo simplificado “Tipo Frame”.
- Los recursos computacionales requeridos para realizar el cálculo de la estructura corresponden a ~5000 elementos y ~22000 ecuaciones para el modelo “Tipo Shell” y a 40 elementos y 120 ecuaciones para el modelo “Tipo Frame”.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- En cuanto al espectro de diseño, ha sido posible determinar que la inclusión de la rama descendente para estructuras con periodo natural sobre 2 segundos en el espectro propuesto, este se torna considerablemente menos conservador a medida que la flexibilidad de la estructura aumenta, llegando a ser, para el caso en estudio, entre un 44% y 48% menor que la extrapolación del espectro ETG 1020 (dependiendo de la forma en que se modele el sistema).
- La evidencia indica que la implementación y oficialización del anteproyecto de norma NCh 2369 supondría menores solicitaciones en la base del aerogenerador y menores esfuerzos internos a lo largo del manto de la torre debidos a eventos sísmicos.
- Se hace necesario abordar el impacto de las definiciones de las combinaciones de carga comparando aquellas contenidas en la NCh 2369 of. 2003 y NCh 3171 of. 2010 usadas típicamente a la fecha versus aquellas en el Proyecto de norma NCh 2369.

FIN