



AEROGENERADORES

Diseño Estructural de Aerogeneradores Una mirada integral

Raúl Campos Q. – RCQ Ingeniería Estructural



Marzo 2019

INDICE PRESENTACIÓN

1. INTRODUCCIÓN
2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA (CHILE)
3. INGENIERÍA BÁSICA
4. ASPECTOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL
5. ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL
6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

INTRODUCCIÓN

- El diseño estructural de Aerogeneradores en Chile ha sufrido una importante evolución desde los primeros Parques Eólicos (2001).
- Inicialmente los Aerogeneradores se consideraban equipos, y cuya certificación internacional se consideraba suficiente para su validación local. Sólo las Torres se verificaban bajo cargas sísmicas locales (básicamente verificación de esfuerzos), y las fundaciones eran diseñadas localmente, pero sin mucha claridad en la filosofía de diseño que se debía considerarse.
- Actualmente esta mirada ha evolucionado, y en algunas compañías especialistas en fabricación y diseño de Aerogeneradores, así como compañías operadoras de Parques Eólicos, han comenzado a enfocar el diseño sísmico no sólo en la fundación y Torre, sino que también en las Aspas, Nacelle y las conexiones.
- De igual forma, el desarrollo de los estudios geotécnicos ha evolucionado hacia la caracterización dinámica de los suelos, incluyendo en algunos pocos casos estudios de riesgo sísmico.

BREVE RESEÑA HISTORICA

- Primer Parque Eólico industrial: Alto Baguales (Coyhaique, 2001). 3 Aerogeneradores de 660 KW. En el año 2015 se agregaron 2 Aerogeneradores de 900 KW de 55 m de altura (Torre de acero).
- Primer Parque Eólico conectado al SIC: Canela I (Coquimbo, 2007). 11 Aerogeneradores de 1.65 MW de 65 m de altura (Torre de acero). En el año 2009 inicia actividades el Parque Eólico Canela II con 40 Aerogeneradores de 1.5 MW y 80 m de altura (Torre de acero).
- Primer Parque Eólico con Torres de Hormigón: San Gabriel (Renaico, 2020). 61 Aerogeneradores de 3.0 MW y 120 m de altura (prefabricado postensado). En actual construcción.
- Actualmente existen proyectos de Parques Eólicos en desarrollo a nivel de Ingeniería y/o Construcción con Torres de acero de 140 y 145 m de altura y 4.5 MW de potencia.
- Al 2018 se contabilizan un total de 651 Aerogeneradores instalados aportando un total de 1.426 MW equivalente al 4.7% de la matriz energética (Acera, 2019).
- **El futuro → AEROGENERADORES DE 5.0 A 6.0 MW DE POTENCIA NOMINAL.**
- **El futuro → TORRES HÍBRIDAS → $H > 160$ m, las cuales se encuentran en fase de análisis y adaptación a condiciones sísmicas locales.**
- A nivel mundial las turbinas de mayor capacidad son de uso marino (offshore), con capacidades nominales de hasta 10 MW (SeaTitan, AMSC, rotor de 190 m y altura de 125 m). En el ámbito terrestre (onshore) las turbinas de mayor capacidad llegan a 7.5 MW (Enercon, rotor de 127 m y 135 m de altura).

ANÁLISIS PRELIMINARES:

- Mediciones de Viento (1 año mínimo, distribución estadística de Weibull, turbulencias, etc.), determinación de la densidad del aire, capacidad de las vías de transporte, etc.
→ Inputs que permiten la definición del tipo y clase de Aerogenerador óptimo
- Geotecnia preliminar: algunos sondajes y en algunos casos mediciones geofísicas.

INGENIERÍA BÁSICA:

- Mediciones geofísicas: **Activas** para perfil de ondas Vs, **Pasivas** para periodo fundamental de los depósitos de suelo (medición de ruido).
- **Geotecnia definitiva:** Sondajes, ensayos de laboratorio, caracterización dinámica de suelos (Módulo de corte “G”, Vs30, resistencia, etc.). En general estos estudios se presentan deficitarios desde el punto de vista dinámico.
- **Estudios de riesgo sísmico** (PSHA, DSHA): sólo en algunos pocos casos se ha desarrollado este tipo de estudios, incluyendo modelación de suelos. Aún es muy poco valorado este tipo de estudios, y en general las empresas mandantes desconocen su real impacto en los diseños (1 m de reducción en el diámetro de 1 fundación cubre el costo del riesgo sísmico).
- Estudios de licuación (elevada incertidumbre en estos análisis por ahora). Hoy existen numerosos proyectos de Parques Eólicos ubicados en zonas licuables.

QUE DIFERENCIA A UN AEROGENERADOR?:

- Estructuras altamente flexibles → $T_0 = 2.5 @ 6.5$ segundos (Chile)
- Respuesta dinámica: concentrada en los 3 primeros modos de vibrar, aportando aproximadamente el 85% de la respuesta en la base de la Torre. La respuesta dinámica es intermedia entre un péndulo y una viga cantiliver con masa distribuida. Las Torres de acero se acercan más a una respuesta pendular y las Torres de hormigón e híbridas a una viga cantilever con masa distribuida.
- Torres de acero: crecen y crecen en altura, pero están restringidas en su diámetro debido a limitaciones en el transporte (por ejemplo: altura libre vertical de puentes). Ejemplo: Torre de acero de 140 m con diámetro basal de 4.7 m → Esbeltez: $H/d \sim 30$ (sección tubular con manto de acero). En las Torres de acero el sismo de diseño ciertamente compite con el viento máximo o extremo (al menos en el actual escenario normativo). En Torres de hormigón no existe competencia.....el sismo controla el diseño.
- El diseño es confidencial (**como es posible ?**) → El revisor sísmico deberá firmar cláusulas de confidencialidad para poder acceder a los análisis y diseños del Aerogenerador, y así otorgar la validación sísmica. La Industria de Aerogeneradores es muy hermética en su tecnología!!.

ASPECTOS DE ANALISIS ESTRUCTURAL

- **Carga de viento normal u operacional:** no existe este tipo de carga en la normativa chilena, la cual sólo se enfoca en la carga de viento máxima. La propuesta de norma NCh2369 incorpora este tipo de carga basada en la normativa internacional que regula el diseño de Aerogeneradores (IEC61400-1; DNV-GL). El diseño de Chimeneas industriales también lo incorpora en la nueva propuesta de norma (el viento normal debe ser sumado al sismo de diseño).
- **El estado límite de fatiga es relevante** (cargas equivalentes para 10 millones de ciclos), dado que las cargas habituales son de tipo dinámica asociadas al giro del rotor, viento, actuaciones de emergencia e incluso detenciones programadas....nada es estático!!. Si se produce un sismo de diseño a 1 año de operación, el Aerogenerador tendrá una mínima reducción de resistencia.....pero si el sismo se produce luego de 20 años de operación, con una importante baja de resistencia por fatiga, cual es el efecto combinado?.
- **Vida útil de Parques Eólicos:** 20 o 25 años (este es el plazo para el cual se certifican los Aerogeneradores). Esta vida útil es muy inferior a la vida útil especificada por ejemplo para edificios y puentes. Esto podría incidir en la demanda sísmica?....desde el punto de vista probabilístico sí, pero nuestra normativa actual no lo considera.
- **Estructuras con bajos niveles de amortiguamiento estructural.** En el caso de Torres de acero los amortiguamientos medidos varían entre 0.5% y 1.5%, por lo cual se asigna un amortiguamiento estructural del 1%. En Torres de hormigón alcanzan amortiguamientos algo mayores. En la situación de operación (giro del rotor), se adiciona el amortiguamiento aerodinámico, lo que permite incrementar el amortiguamiento total a valores por sobre el 5%, aspecto que es reconocido en la propuesta de norma NCh2369. Este punto incide fuertemente en la definición de la demanda sísmica.
- **Cargas denominadas “No Gapping” o Cuasi permanentes,** para las cuales la fundación no debe despegarse del suelo (de forma conservadora aquellas que se repiten más de 10 mil veces, o 1750 horas en 20 años, o 2192 horas en 25 años, es decir, probabilidad de excedencia del 1%).

ASPECTOS DE ANALISIS ESTRUCTURAL

ENFOQUES ACTUALES PARA DETERMINAR CARGAS:

- **Cargas dinámicas:** análisis acoplado de cargas de operación (viento, giro rotor, actuaciones de emergencia). Uso de software especializados (BLADE, FAST, etc.). Estas cargas se basan en normativas tales como IEC61400-1 o DNV-GL.
- **Cargas sísmicas:** 1) Método 1: Análisis Modal Espectral, desacoplado de las cargas dinámicas (viento, giro del rotor, actuaciones de emergencia); 2) Método 2: Análisis tiempo – historia lineal con acoplamiento de registros sísmicos y operacionales (giro rotor, viento, actuaciones de emergencia). La determinación de cargas sísmicas se ha enfocado en la Torre y las fundaciones. Sin embargo, y con la distribución de la propuesta de norma NCh2369, los fabricantes de Aerogeneradores (llamados habitualmente “tecnólogos”), han puesto la mirada en las cargas sísmicas que deben resistir las Aspas, Nacelle y la conexión Nacelle – Torre). La pregunta relevante es: ¿De qué sirve que la Torre y la fundación no sufran daño debido a un sismo de diseño si fallan las Aspas, o la Nacelle o su contenido?.
- **Modelaciones:** los fabricantes de Aerogeneradores han desarrollado modelos 3D mediante sofisticados software, tales como ANSYS, ABAQUS, etc. (habituales en ingeniería mecánica).
- **Interacción suelo – fundación:** habitualmente no se incorpora en los modelos globales del Aerogenerador, considerando la Torre empotrada en la fundación. El efecto de la rigidez del suelo se incluye especificando una rigidez mínima de rotación, requerida para no modificar más allá de cierto límite las frecuencias de operación del Aerogenerador.
- Imagen: Túnel de viento para Torre de Aerogenerador (U. de la Coruña, 2017).



ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

COMO Y QUE DEBEMOS DISEÑAR / VERIFICAR:

1) FUNDACIONES: Su costo es muy incidente en el proyecto

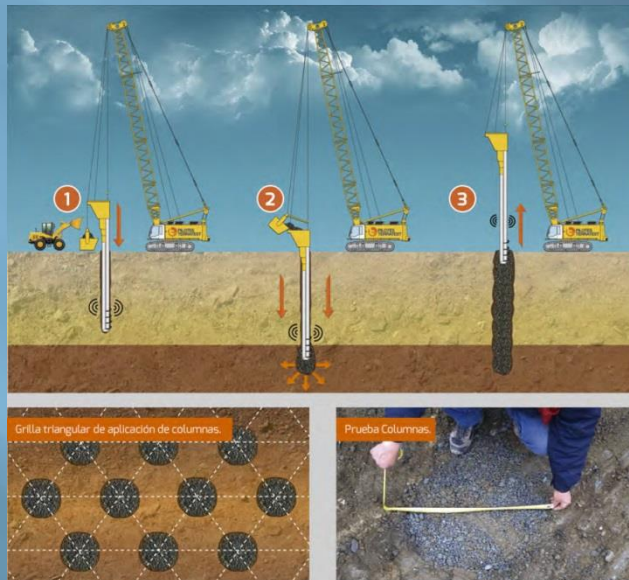
- TIPOLOGÍAS: las más utilizadas actualmente es la circular ya sea maciza o nervada. En la imagen de la izquierda se muestra una fundación maciza (fuente: Marcelo Peña, Besalco Energía, 2018), y en la derecha una fundación nervada (fuente: Raúl Campos Q., 2018).



- ESTABILIDAD: se realiza según norma NCh2369:2003.....se debe considerar la inercia de las fundaciones para cumplir con el 80% del área mínima de compresiones?....el peso de la fundación excede por mucho al peso del Aerogenerador (Torre de acero: 1 a 6; Torre de hormigón: 1 a 2.4). Qué porcentaje de levantamiento se debe permitir considerando las fuerzas inerciales de la fundación?.....El porcentaje de levantamiento es independiente del tipo de suelo: roca, grava, suelo fino, suelo licuable?....Que pasa con las posibles deformaciones post-sismo?....estas preguntas abren un interesante debate, no resueltas por la actual normativa o práctica profesional.

ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

- MEJORAMIENTOS DE SUELO: La práctica actual en aquellas suelos que no es posible establecer fundaciones directas, o incluso con potencial de licuación, es disponer un mejoramiento de suelo mediante columnas o pilas de gravas (vibro sustitución). En la imagen izquierda se muestra un esquema del método; la imagen de la derecha muestra la instalación de columnas de grava en el Parque Eólico Raki (VIII Región, 2014); se usaron columnas de 80 cm de diámetro dispuestas a tres bolillo, de longitudes entre 9 y 13 m (fuente: Terratest).



Este tipo de mejoramiento han sustituido completamente el uso de pilotes, dado que reduce los costos de forma considerable. Actualmente se están realizando mejoramientos de este tipo en suelos licuables en la región del Bío Bío y Araucanía (tendremos un gran laboratorio para el próximo gran sismo). Si consideramos que los propios métodos actuales para evaluar la licuación presentan incertidumbres y errores para zonas subductivas como la chilena (métodos simplificados para sismos corticales), cabe preguntarse cual es el real sustento para validar esta técnica de mejoramiento en suelos licuables. Tendremos que esperar por el próximo gran terremoto para que nos cuente su opinión de esta técnica.

ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

En las figuras se compara un registro del Loma Prieta 1989 (izquierda) y un registro de Maule 2010 (derecha):

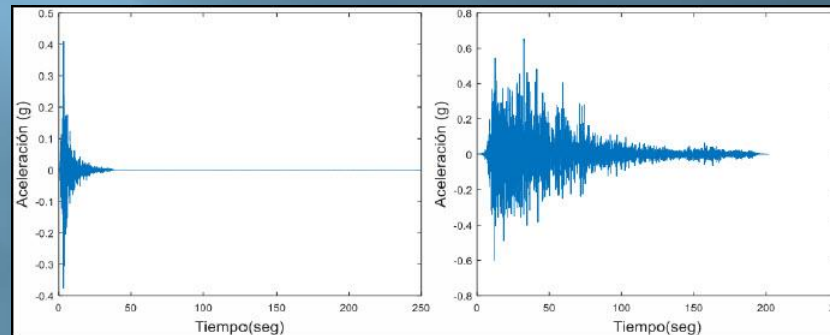


Figura 3.1. Registros de aceleraciones terremotos de Loma Prieta 1989, estación Gilroy #1 (izquierda); y Maule 2010, estación San Pedro de la Paz (derecha).

Fuente: Evaluación del potencial de licuación en zonas de subducción, Proyecto CONICYT ID16110157.

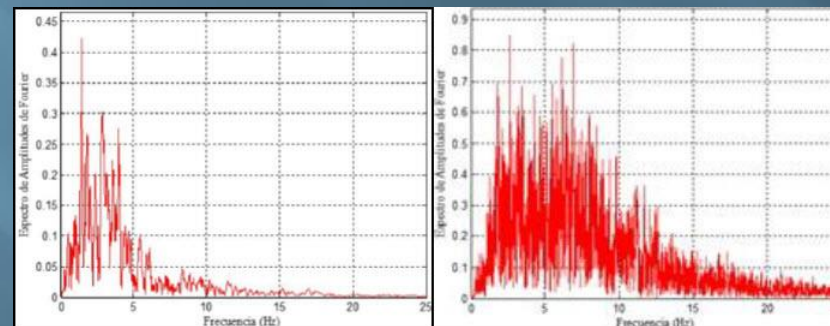


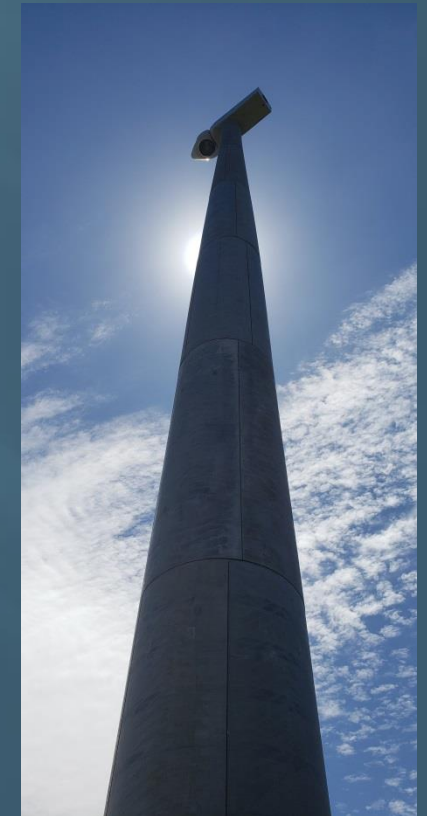
Figura 3.2. Espectros de amplitud terremotos de Loma Prieta 1989, estación Gilroy #1 (izquierda); y Maule 2010, estación San Pedro de la Paz (derecha).

Fuente: Montaña et al, 2016.

ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

➤ 2) TORRES Y SU CONEXIÓN CON LA FUNDACIÓN:

- En la imagen de la izquierda Torre de Acero de 110 m (Fuente: Marcelo Peña, Besalco Energía). En la imagen de la derecha Torre de hormigón de 120 m (Fuente: Raúl Campos Q.):
- Torre de acero: si bien se verifica bajo combinación de cargas sísmicas, no existe una real preocupación en el diseño sísmico bajo criterios de ductilidad (aceros dúctiles, pandeo local, etc.). Los efectos de segundo orden son relevantes en estos casos. El anillo de conexión entre la Torre y la Fundación no cumple con los criterios de ductilidad de la norma NCh2369:2003, por lo cual a lo menos se debieran verificar con criterios de sobre-resistencia, lo cual no se realiza en la mayoría de los casos (por no decir en ningún caso). Tampoco se verifica con criterios de ductilidad la conexión entre la Nacelle (o Góndola) y la Torre.
- Torre de hormigón prefabricado postensado: dada su tipología, esta Torre presentan algunos desafíos interesantes, dado que se trata de hormigones de alta resistencia sometidos a elevados niveles de compresión, lo que lleva a establecer refuerzos de confinamiento. Por tratarse de elementos prefabricados, las conexiones merecen una especial atención.



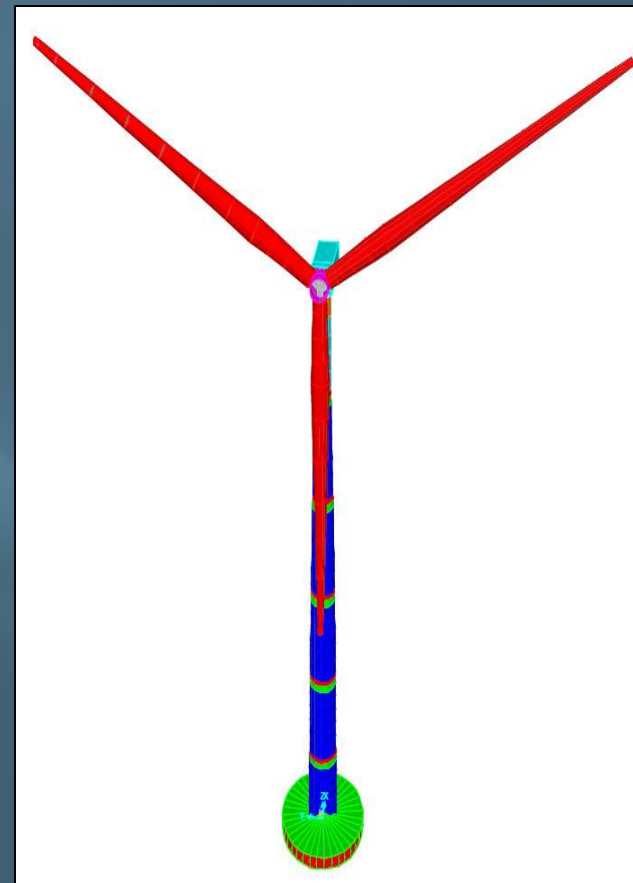
ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

- 3) Aspas: fibra de vidrio, o fibra de vidrio reforzada con fibra de carbono.
- Actualmente, sólo algunos fabricantes realizan verificación sísmica de las Aspas, elementos que ya han presentado fallas durante sismos en Chile (Illapel, 2015).
- De acuerdo a las verificaciones de algunos fabricantes, para la condición sísmica se presentan sobre esfuerzos en las Aspas, en especial cuando la demanda sísmica se basa en la ETG1015. Debido a esto, la realización de estudios de riesgo sísmico que permitan establecer las demandas sísmicas de sitio podría tornarse atractivo.



CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- El diseño actual de los Aerogeneradores no se ajustan totalmente a la filosofía de diseño sísmico chileno, y en especial lo relativo a detallamiento dúctil de conexiones.
- Dado los elevados periodos de vibrar, es necesario y recomendable desarrollar estudios de riesgo sísmico, incorporando modelaciones de los estratos de suelo.
- La norma NCh2369:2003 no permite abordar el diseño de fundaciones de una forma racional.
- Los mejoramientos de suelo en el caso de licuación deben ser analizados con precaución, toda vez que los métodos simplificados de licuación sobre los cuales se basan los análisis, presentan importantes errores en el caso de zonas subductivas como la chilena.



MUCHAS GRACIAS

Raúl Campos Q. – RCQ Ingeniería Estructural

