

## MODELADO DE AEROGENERADORES DE GRAN ESCALA CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO-FLUIDO-ESTRUCTURA

Turello, Diego Fernando<sup>a,b,c</sup>; Maza, Mauro Sebastian<sup>a</sup>; Soffietti, Franco Primo<sup>a</sup> y  
Preidikman, Sergio<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina.

<sup>b</sup> IDIT (UNC-CONICET), Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina.

<sup>c</sup> GIMNI – UTN-FRSF, Lavaisse 610,3000 Santa Fe, Argentina.

[diego.turello@unc.edu.ar](mailto:diego.turello@unc.edu.ar)

**Palabras clave:** Energía eólica, Interacción fluido-estructura (IFE), Interacción suelo-estructura (ISE)

### RESUMEN

El incremento en el tamaño de los aerogeneradores de eje horizontal para optimizar el recurso eólico conlleva desafíos estructurales críticos, especialmente en zonas de alta sismicidad. Este trabajo integra avances previos en un modelo computacional unificado que acopla la respuesta aerodinámica de las palas (interacción fluido-estructura) con el comportamiento dinámico de la torre y su fundación. El núcleo de la investigación se centra en la transición de modelos de base fija a modelos de base flexible, incorporando la interacción suelo-estructura (ISE) mediante sistemas discretos de resorte-amortiguador. Estos elementos son calibrados a partir de modelos 3D complejos y consideran la degradación de rigidez y la no-linealidad material del suelo ante cargas cíclicas. La comparación de resultados entre ambas configuraciones permite cuantificar el impacto de la flexibilidad de la base y la respuesta del terreno en la seguridad y el diseño de turbinas de gran escala sometidas a la acción combinada de viento y sismo.

### ABSTRACT

*The scaling up of horizontal-axis wind turbines to maximize energy extraction presents significant structural challenges, particularly in seismically active regions. This paper integrates previous research into a unified computational model that couples aerodynamic blade response (fluid-structure interaction) with the dynamic behavior of the tower and its foundation. A central focus is the transition from fixed-base to flexible-base models, incorporating soil-structure interaction (SSI) through discrete spring-dashpot systems. These elements are calibrated from complex 3D models and account for soil stiffness degradation and material non-linearity under cyclic loading. By comparing fixed and flexible base configurations, this study quantifies the impact of foundation flexibility and soil response on the safety and design of large-scale turbines under combined wind and seismic loads.*

## INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en lo que refiere al diseño y análisis de aerogeneradores de eje horizontal es incrementar su tamaño para conseguir aumentar la energía extraída del recurso eólico. Al estar instaladas en regiones sísmicamente activas, las turbinas eólicas tienen el riesgo potencial de ser alcanzadas por algún tipo de solicitación sísmica durante su vida útil, lo cual hace necesario estudiar el desempeño de este tipo de estructuras ante tal tipo de cargas. Para modelar correctamente estas estructuras bajo solicitaciones sísmicas, además de la interacción fluido-estructura es necesario tener en cuenta la interacción suelo-estructura, la cual está caracterizada por la tipología de fundación de la torre y los parámetros materiales del suelo y las estructuras de fundación. Ante un evento sísmico existen incertidumbres sobre el desempeño de las estructuras de fundación, ya que las mismas se diseñan, en general, para cargas de uso normal; sin embargo, frente a las solicitaciones cíclicas que induce el sismo la rigidez del suelo se degrada fuertemente, lo que genera que la respuesta sea no-lineal inclusive para puntos del suelo lejos de la falla. Ignorar esta interacción puede conducir a estimaciones inexactas del comportamiento estructural y, por lo tanto, comprometer la seguridad y la eficiencia de la estructura. Las torres eólicas generalmente utilizan fundaciones superficiales, las cuales pueden sufrir asentamientos diferenciales permanentes durante la fase de excitación sísmica debido a la degradación de rigidez del suelo donde se apoyan.

En este trabajo se modela una turbina eólica de eje horizontal de gran tamaño en donde se tienen en cuenta los efectos de interacción fluido-estructura entre las palas y el medio-aire. El análisis se realiza en el dominio del tiempo debido a las no-linealidades presentes en el problema, tanto en la parte aerodinámica, como en la estructural. El problema aeroelástico se aborda con un enfoque de co-simulación, vinculando dos herramientas computacionales independientes: I) LHAWT/AC [5] la cual es una implementación del Método de Red de Vórtices Inestacionario (UVLM) [10] desarrollada para simular aerodinámicamente turbinas eólicas de eje horizontal de tres palas; y II) Simpack [4] el cual es un programa de simulación dinámica estructural basada en el Método de Elementos Finitos que admite no linealidades geométricas y materiales. Las cargas aerodinámicas no-conservativas calculadas con LHAWT/AC se aplican sobre el modelo estructural de Simpack, del cual a su vez se obtienen posiciones y velocidades que intervienen en las condiciones de borde del problema aerodinámico. El acoplamiento se realiza por medio de un esquema de interacción débil desarrollado específicamente para este tipo de problemas como el planteado en [9]. La herramienta computacional resultante permite realizar simulaciones en el dominio del tiempo con integración explícita de las ecuaciones de movimiento, y es capaz de representar el comportamiento aeroelástico no-lineal e inestacionario con un costo computacional moderado a bajo.

Las fundaciones de las turbinas eólicas de grandes dimensiones pueden ser de diversas tipologías, por ejemplo, zapatas aisladas circulares, zapatas ancladas, mono-pilotes, grupo de pilotes, dependiendo su elección de múltiples factores, entre los que se encuentran: el tamaño de la turbina, las cargas a transmitir al suelo, las propiedades mecánicas del suelo de fundación, la estructuración del perfil de suelo en la zona de fundación, etc. El uso de la zapata aislada circular es una práctica común en este tipo de casos, por ello es la tipología que se adopta como caso de estudio en este trabajo

[14]. La interacción suelo-estructura (ISE) depende fuertemente de la tipología de la fundación y las propiedades mecánicas de los medios intervinientes. Como una primera aproximación a modelar esta interacción se propone el uso de modelos concentrados standard resorte-amortiguador para estimar la rigidez estática y dinámica del sistema suelo-fundación. Además se considera una masa agregada a la de la fundación que es la masa de suelo que se mueve solidaria a la fundación. Al considerar estos modelos concentrados es necesario introducir amortiguadores o disipadores viscosos para modelar la radiación de energía que se da en el medio suelo al considerarlo como un medio semi-infinito.

## MODELO ESTRUCTURAL ANALIZADO

En este trabajo se analiza un modelo estructural de la turbina eólica que cuenta con la flexibilidad y masa distribuida de las palas y la torre y que permite evaluar la respuesta dinámica de la estructura (posición, velocidad y aceleración) frente a las cargas aerodinámicas aplicadas. Además se incorporan cuerpos rígidos para modelar el cubo y la góndola, con sus respectivas masas e inercias. Se introducen restricciones cinemáticas para modelar los grados de libertad rotacionales entre los cuerpos rígidos que representan el cubo y la góndola. Un esquema de estos modelos se muestra en la Figura 1. Las palas se modelan como elementos de vigas con masa y rigidez variables en la longitud. El ángulo de ataque de las palas es una variable de entrada del problema y en este caso no se modifica durante la simulación.

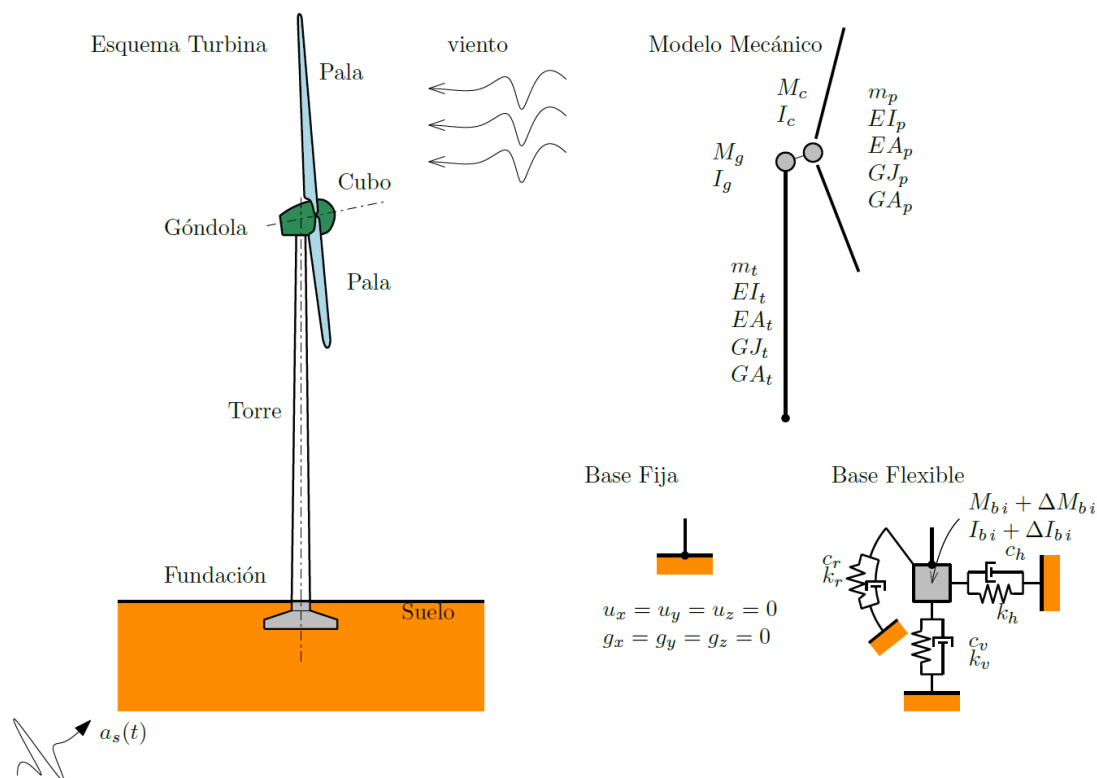


Figura 1. Esquema estructural de la torre eólica y su fundación.

Se utiliza un esquema explícito para la integración temporal (diferencias centrales, de segundo orden). La Ecuación de Movimiento se expresa como:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{int} \quad (1)$$

donde,  $\ddot{\mathbf{X}}$  y  $\dot{\mathbf{X}}$  son los vectores de aceleraciones y velocidades nodales, respectivamente,  $\mathbf{M}$  es la matriz de masa,  $\mathbf{C}$  la matriz de amortiguamiento,  $\mathbf{F}_{ext}$  el vector de cargas externas, y  $\mathbf{F}_{int}$  el vector de cargas internas. El vector de cargas internas se obtiene a través del ensamble de los vectores elementales, los cuales se determinan en cada paso de cálculo por integración sobre los elementos finitos. El vector de cargas externas puede contener tanto componentes conservativas como no conservativas. Se considera un modelo material visco-elástico y la viscosidad se utiliza para determinar tensiones viscosas proporcionales a las velocidades de deformación. Su efecto se incluye en el vector  $\mathbf{F}_{int}$ . La pala se modela utilizando elementos finitos de vigas con una formulación tipo GEBT (Geometrically Exact Beam Theory) desarrollada por Simo ([12], [13]). Se trata de elementos de dos nodos con funciones de forma lineales estándar. La matriz constitutiva admite elementos fuera de la diagonal para representar los acoplamientos entre distintos esfuerzos internos que están relacionados a las complejidades tanto de las geometrías de las secciones de la pala, así como a la distribución de materiales en ellas. Las propiedades de viga equivalente se determinan con PreComp (Bir, 2005).

### Propiedades del modelo estructural

En este modelo se adopta una torre constituida por una sección transversal anular de acero, con diámetro exterior variable entre  $d_t = 10,87\text{m}$  a  $6,13\text{m}$  y espesor variable entre  $t_t = 0,0347\text{m}$  a  $0,0253\text{m}$ , para las secciones de la base de la torre y la sección superior, respectivamente. El material adoptado para la torre tiene propiedades mecánicas:  $E_t = 2,1 \times 10^2 \text{ GPa}$ ,  $\nu_t = 0,3$ ,  $\rho_t = 7850 \text{ kg/m}^3$ . La altura de la torre hasta la góndola es de  $H = 135\text{m}$ . Las palas están compuestas por los modelos SNL-100 del Sandia National Laboratories, con  $100\text{m}$  de longitud y cuyas propiedades mecánicas se pueden ver en [6]. La masa de cada una de las palas es  $m_p = 1,12 \times 10^5 \text{ kg}$ . Las masas de la góndola y el cubo, incluyendo elementos finitos específicamente colocados como elementos de unión, suman  $M_g + M_c = 14,07 \times 10^5 \text{ kg}$ . Tanto para las palas como para la torre se adoptan elementos finitos de viga 3D con una formulación de tipo Geométricamente Exacta (GEBT) ([12], [13]), y una representación de cuerpos rígidos para la góndola y el cubo (es decir, no se representan individualmente los mecanismos internos).

### Modelo mecánico de la fundación

Usualmente la base de la torre suele considerarse perfectamente empotrada en los sistemas de fundación que son modelados como rígidos (alternativa de base FIX o fija en la Figura 1). Por ello los esfuerzos calculados en estos modelos son utilizados para verificar las estructuras de fundación en una etapa totalmente desacoplada a la resolución del problema mecánico estructura más fluido. En esta contribución, se incorpora en el modelo aeroelástico acoplado un modelo viscoelástico para las

fundaciones de la torre, de forma tal de considerar la flexibilidad que aportan a la estructura y poder determinar la respuesta acoplada teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura (ver el esquema para base flexible en la Figura 1). Para considerar la base flexible, el nudo inferior de la torre está vinculado al medio suelo a través de elementos spot en Simpack, que proporcionan tanto la rigidez elástica como la disipación viscosa en las direcciones consideradas. Además, en este nudo se coloca la masa de la fundación, más la contribución de la masa agregada del suelo al moverse solidaria a la base. Un esquema de estos modelos se muestra en la Figura 2 (por cuestiones de claridad en la figura no fueron incluidos todos los pares resorte-amortiguador). Los parámetros de rigidez y viscosidad de los elementos discretos utilizados para modelar la base flexible en Simpack (Figura 2) fueron calibrados a partir de los resultados de simulaciones realizadas en PLAXIS 3D [2] utilizando un modelo completo de las fundaciones. En este caso se considera una zapata aislada con un diámetro  $D_b = 20,00\text{m}$  ([7], [14]) apoyada sobre el suelo, el cual está compuesto por arena suelta a media (con velocidades de propagación de ondas de corte de  $V_s = 200\text{m/s}$  y  $V_s = 400\text{m/s}$ , respectivamente). De esta forma se generan dos escenarios de rigideces de fundación distintas, uno denominado blando y otro rígido (en adelante soft o loose sand, y stiff o dense sand). Se adopta para el suelo el modelo constitutivo Hardening Soil Model with Small Strains (HS-SM [1]) el cual modela la degradación de rigidez a bajas deformaciones y es útil para analizar cargas cíclicas como la sísmica. Los parámetros adoptados para el suelo se muestran en la Tabla 1. La zapata se modela como un sólido elástico con los siguientes parámetros:  $E_h = 23500\text{ MPa}$ ,  $\nu_h = 0,17$ ,  $\gamma_h = 25\text{ kN/m}^3$ . Sobre la frontera entre la zapata y el suelo se considera un interfaz no-lineal que modela la interacción entre ambos dominios sólidos. Se modela un escenario con una carga estática aplicada sobre la zapata para calcular la rigidez equivalente del modelo concentrado (se consideran cuatro modos de carga: vertical, horizontal, flector o torsor) y las constantes de disipación estimadas en función las rigideces degradadas. En la Figura 3 se muestran las fuerzas y momentos estáticos sobre las fundaciones en función de la deformación y de la velocidad de propagación de ondas de corte del suelo  $V_s$ . Puede verse que la respuesta del sistema de fundación es altamente no-lineal, manifestando para la carga horizontal y el momento de cabeceo o rocking una carga última claramente definida. Para los otros estados de carga la fuerza vertical o el momento torsor aumentan con la deformación en todo el rango de desplazamientos analizado. Todas las curvas de respuesta no-lineal de las fundaciones son tangentes a la respuesta elástica-lineal al inicio de la carga, pero rápidamente se alejan de la respuesta elástica inicial debido a las no-linealidades presentes en el material de suelo. Puede verse que la rigidez del modelo concentrado varía sensiblemente con la rigidez del suelo.

| Parámetro                                          | Nombre                  | Unidad            | Arena Suelta | Arena Media |
|----------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| Soil unit weight above phreatic level              | $\gamma_{\text{unsat}}$ | kN/m <sup>3</sup> | 16           | 16          |
| Soil unit weight below phreatic level              | $\gamma_{\text{sat}}$   | kN/m <sup>3</sup> | 20           | 20          |
| Secant stiffness in standard drained triaxial test | $E_{50 \text{ ref}}$    | kN/m <sup>2</sup> | 7.83E+03     | 3.13E+04    |
| Tangent stiffness for primary oedometer loading    | $E_{\text{oed ref}}$    | kN/m <sup>2</sup> | 6.26E+03     | 2.51E+04    |
| Unloading / reloading stiffness                    | $E_{\text{ur ref}}$     | kN/m <sup>2</sup> | 2.35E+04     | 9.39E+04    |
| Power for stress-level dependency of stiffness     | $m$                     | -                 | 0.50         | 0.50        |
| Cohesion                                           | $c'$                    | kN/m <sup>2</sup> | 0.00         | 0.00        |
| Friction angle                                     | $\varphi'$              | °                 | 30           | 32          |
| Dilatancy angle                                    | $\psi'$                 | °                 | 0.00         | 0.00        |
| Shear strain at which $G_s = 0,722 G_0$            | $\gamma_{0,7}$          | -                 | 1.00E-04     | 1.00E-04    |
| Shear modulus at very small strains                | $G_{0 \text{ ref}}$     | kN/m <sup>2</sup> | 6.52E+04     | 2.61E+05    |
| Poisson's ratio                                    | $\nu'$                  | -                 | 0.20         | 0.20        |
| Shear wave velocity                                | $V_s$                   | m/s               | 200          | 400         |

Tabla 1 - Parámetros materiales considerados para la arena suelta y media en el modelo Hardening Soil Model with Small Strains.

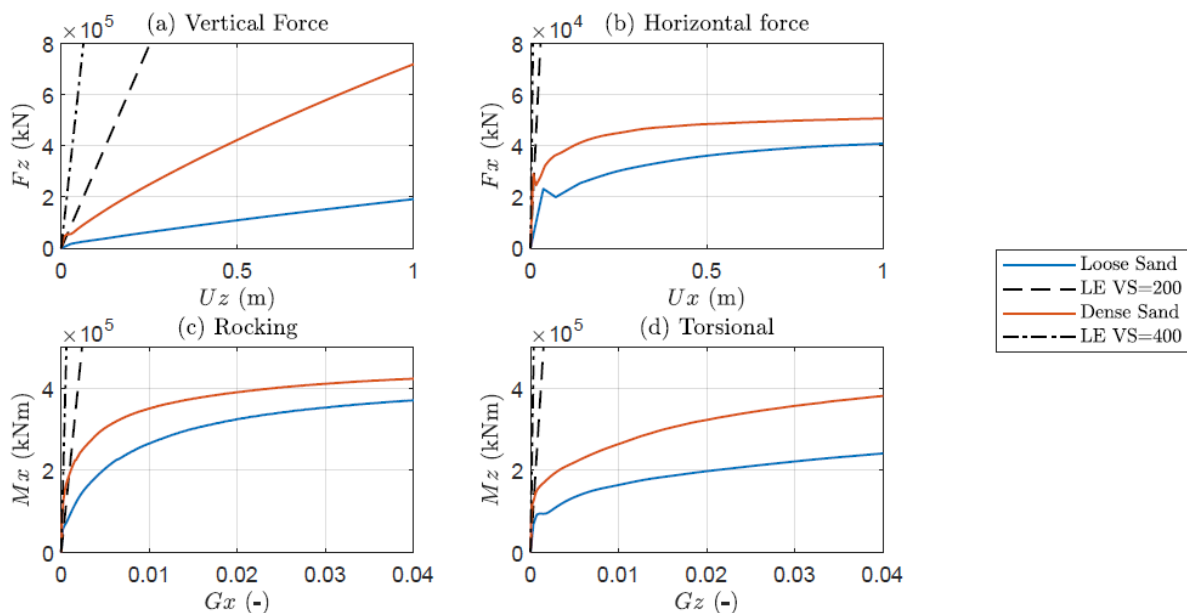


Figura 2. Fuerzas estáticas para diferentes rigideces de suelo: (a) Vertical  $K_v$ , (b) Horizontal  $K_h$ , (c) Flexional (rocking)  $K_r$  y (d) Torsional  $K_t$ .

## Modelo aerodinámico

Se emplea una versión inestacionaria del clásico Método de Red de Vórtices [7]. En la Figura 3 se muestran los componentes principales del método y la forma de interacción entre la grilla aerodinámica y la estructural. Este modelo implica la suposición de flujo potencial en todo el dominio excepto por las zonas correspondientes a los contornos de los cuerpos sumergidos en la corriente fluida y en las estelas. Esto equivale a suponer que toda la vorticiudad se concentra en capas de espesor infinitesimal, algunas adheridas a las superficies de los cuerpos sumergidos

Organiza:

(representando las capas límites), y otras libres (representando las estelas). Las estelas son convectadas desde los bordes de fuga de las superficies sustentadoras a la velocidad local de las partículas de fluido, tomando posiciones de modo que no actúen fuerzas resultantes sobre las mismas. Los dos tipos de láminas vorticosas se unen en los bordes desde donde es convectada la estela. Las sábanas vorticosas que representan las capas límites y las estelas son discretizadas en redes de vórtices, denominadas aquí grillas aerodinámicas (GA). Los vórtices son segmentos vorticosos rectos que dividen las láminas vorticosas en elementos de área denominados paneles, en cuyos centros geométricos se encuentran los puntos de control. Los vértices de los paneles se denominan nodos aerodinámicos. Las posiciones y velocidades de los puntos de control y de los nodos aerodinámicos son datos del problema y se actualizan instante a instante a partir de la respuesta dinámica calculada con el modelo estructural. La posición de los puntos de control sobre la grilla adherida se puede escribir en función de la posición de los nodos de la malla estructural ([8]) como:

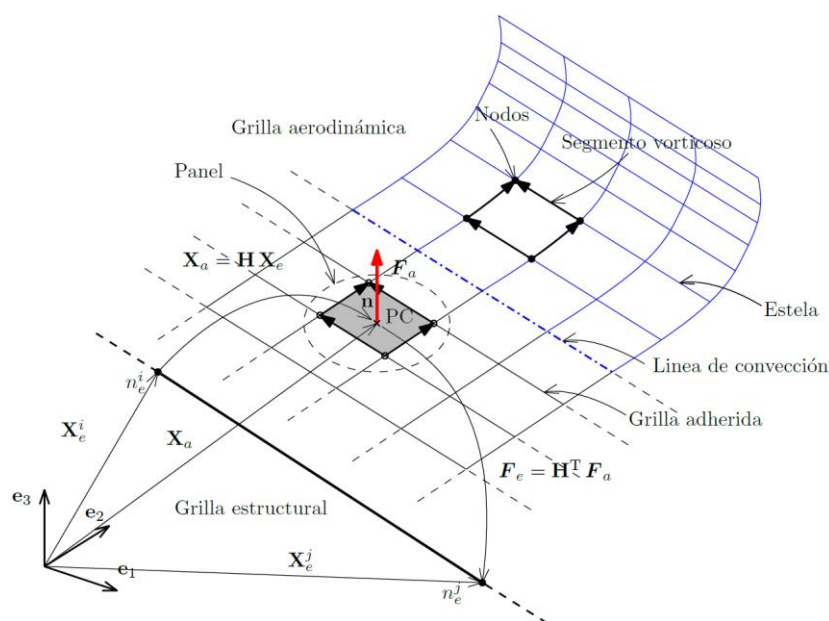
$$\mathbf{X}_a = \mathbf{H} \mathbf{X}_e \quad (2)$$

donde,  $\mathbf{H}$  es un operador que mapea posiciones sobre la grilla estructural a posiciones sobre la grilla aerodinámica teniendo en cuenta las hipótesis básicas sobre el comportamiento seccional de la viga. En cada punto de control se determina una fuerza aerodinámica ( $\mathbf{F}_a$ ) que se utiliza para cargar al modelo estructural. Las cargas nodales equivalentes sobre la grilla estructural ( $\mathbf{F}_e$ ) se calculan en función de las fuerzas aerodinámicas ( $\mathbf{F}_a$ ) utilizando la transpuesta de la función de mapeo  $\mathbf{H}$ :

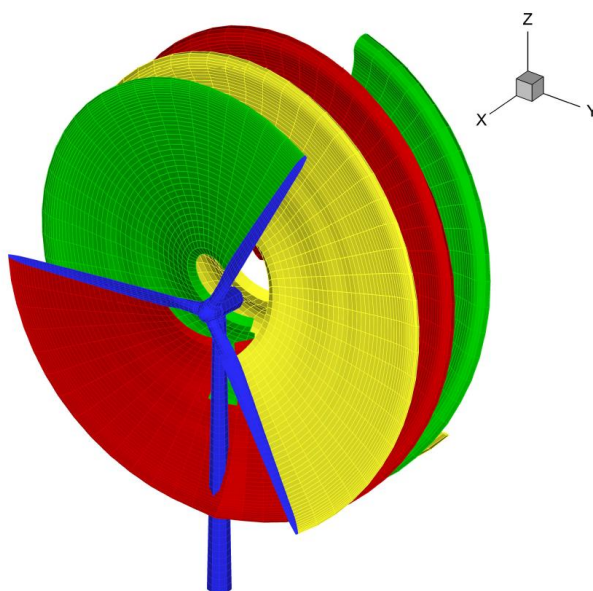
$$\mathbf{F}_e = \mathbf{H}^T \mathbf{F}_a \quad (3)$$

de esta forma, las fuerzas aerodinámicas sobre la superficie sustentadora son transformadas en un vector de cargas generalizadas en el modelo de vigas (fuerzas y momentos).

En la Figura 4 se muestran las estelas generadas para una velocidad de viento  $V_\infty = 9,12$  m/s y una velocidad de rotación del cubo de 0,7308 rad/s. Cabe mencionar que el modelo tiene en cuenta la distribución de velocidades de viento correspondientes a la capa límite terrestre según se especifica en el reglamento CIRSOC 102 [11] considerando la categoría de exposición de terreno C. En el presente desarrollo del modelo UVLM se contempló únicamente la distribución espacial media de velocidades en altura (gradiente cinemático de capa límite), omitiendo las componentes fluctuantes de turbulencia.



*Figura 3. Esquema del método UVLM.*



*Figura 4. Grillas aerodinámicas, estelas generadas con la rotación de la turbina y coordenadas globales utilizadas.*

## CARGAS CONSIDERADAS EN ESTE TRABAJO

### Cargas gravitatorias y de viento

En este estudio se realiza un análisis en el dominio del tiempo. La simulación total se compone de varias estrategias que modelan diferentes instancias, es decir, carga gravitatoria, carga de viento y carga sísmica. En la primera estrategia, la carga gravitatoria se aplica a todo el modelo (en dirección global  $-z$ ), seguida de una

estrategia en la que se activa el viento (en dirección global  $-x$ ) y la turbina alcanza un régimen estacionario. Estas dos fases combinadas tienen una duración de 100 s. La velocidad del viento se elige como  $V_{\infty} = 9.12$  m/s, lo que genera una frecuencia de rotación en estado estacionario del rotor de 0,116 Hz.

### Cargas sísmicas consideradas

Después de que la simulación entra en régimen estacionario, se aplican cargas sísmicas a la base del modelo, analizando dos escenarios. El primero es la carga sísmica actuando en la dirección  $x$  y el segundo en la dirección  $y$ . Estos escenarios se denotan como SX y SY, respectivamente. La estrategia donde se consideran cargas sísmicas se desarrolla en el intervalo de tiempo entre  $t = 100$  s a  $t = 160$  s. Después de la fase de carga sísmica, sigue una estrategia en la que solo se consideran las cargas de viento y las gravitatorias.

|                | Seismic Record |       |       |
|----------------|----------------|-------|-------|
|                | LP             | IC    | CC    |
| PGA ( $g$ )    | 0.54           | 0.49  | 0.57  |
| AI (m/s)       | 3.70           | 4.33  | 2.31  |
| $D_{5-95}$ (s) | 14.87          | 29.14 | 15.93 |

Tabla 2 - Parámetros de los diferentes registros sísmicos considerados en este artículo.

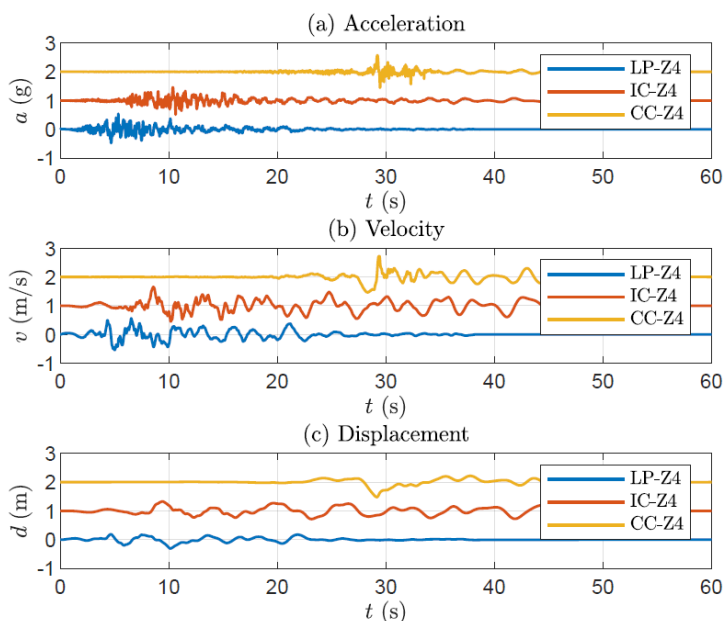


Figura 5. Historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos para los registros de Loma Prieta, Imperial College y Chichi ajustadas al reglamento CIRSOC [3].

Los registros sísmicos considerados en este estudio corresponden a las señales

registradas en *Imperial College*, *Loma Prieta* y *Chichi* (IC, LP y CC, respectivamente), las cuales se ajustan al espectro de diseño elástico de la normativa [3], considerando la zona 4 para suelos tipo B y un factor de importancia B. La Figura 5 muestra las historias de aceleración como fracción de la aceleración de la gravedad para las señales consideradas. Diferentes parámetros sísmicos se presentan en la Tabla 2 para los tres registros considerados.

## RESULTADOS

### Modos y frecuencias

En esta sección se presentan los modos y frecuencias naturales del modelo de aerogenerador, considerando los efectos de la interacción suelo-estructura. La frecuencia natural más baja para la pala, en el caso de una base fija, es de 0,42 Hz [6]. En este problema, la velocidad del aire se elige de manera que se obtenga una frecuencia de rotación estacionaria del rotor de 0,116 Hz. Además, se señala que la frecuencia 3p es de 0,389 Hz. Para fines comparativos, la primera frecuencia fundamental de la estructura completa se estima mediante un modelo simplificado que considera a la estructura como un péndulo invertido:

$$f_1 = \sqrt{\frac{3.04 EI}{(Mt + 0.277 mt H) 4\pi^2 H^3}} \quad (4)$$

donde EI representa la rigidez a la flexión de la torre (considerada constante en su formulación simplificada), Mt es la masa puntual ubicada en la parte superior de la torre (correspondiente a la masa total de las palas, la góndola y el cubo), mt es la masa distribuida a lo largo de la torre y H es la altura total de la misma. Dado que en este caso la rigidez flexional de la torre no es constante a lo largo de su altura, se consideran los valores de diámetro externo y espesor a mitad de la altura de la torre para estimar un valor probable de esta primera frecuencia aproximada. A partir de estos parámetros, se obtiene una frecuencia natural estimada de 0,156 Hz para el modelo simplificado. En la Tabla 3, se presentan las frecuencias fundamentales correspondientes a los diez primeros modos. Se observa que la expresión analítica aproxima a las dos primeras frecuencias fundamentales del modelo numérico. El primer modo es de flexión en dirección y mientras que el segundo es de flexión en dirección x. Estos modos son muy similares y sus frecuencias muy próximas. La consideración de la interacción suelo-estructura en la cimentación para la determinación de los modos y frecuencias fundamentales reduce las frecuencias naturales del sistema. Esta reducción depende de la rigidez del sistema suelo-cimentación: en el caso de arena densa, la disminución es mínima, mientras que en el caso de arena suelta, la reducción puede alcanzar hasta un 8.61% respecto a la frecuencia fundamental obtenida con un modelo de base fija.

| Mode | Descr.          | Rigidez de la base |       |       |
|------|-----------------|--------------------|-------|-------|
|      |                 | Fix                | Stiff | Soft  |
| 1    | BT $Y_1$        | 0.167              | 0.166 | 0.161 |
| 2    | BT $X_1$        | 0.169              | 0.167 | 0.163 |
| 3    | TT&FW           | 0.360              | 0.359 | 0.359 |
| 4    | BT $X_2$ &FW    | 0.403              | 0.402 | 0.402 |
| 5    | BT $X_1$ &FW    | 0.429              | 0.429 | 0.428 |
| 6    | BT $Y_2$ &FW-EW | 0.556              | 0.555 | 0.552 |
| 7    | -               | 0.652              | 0.652 | 0.652 |
| 8    | -               | 0.688              | 0.688 | 0.687 |
| 9    | -               | 0.921              | 0.920 | 0.919 |
| 10   | -               | 1.045              | 1.044 | 1.040 |

Tabla 3 - Frecuencias naturales en Hz para el modelo estructural y diferentes rigideces de suelo.

### Desplazamientos de la góndola

En esta sección se presentan algunos resultados de las corridas aeroelásticas considerando la carga del sismo. Por razones de brevedad, solo se presentan los resultados correspondientes a la señal de Loma Prieta (LP). En la Figura 7 se muestran los desplazamientos  $u_x$ ,  $u_y$  y  $u_z$  (Figura 7-(a), (c), (e), respectivamente), así como también los giros  $g_x$ ,  $g_y$  y  $g_z$  (Figura 7-(b), (d), (f), respectivamente) de la góndola para cuando el sismo se aplica en dirección x. Estas componentes de desplazamientos y giros se muestran para las hipótesis de base fija (FIXED) y base flexible considerando una respuesta visco-elástica lineal y no lineal con dos rigideces de suelos. Luego de la fase de sismo las únicas cargas actuantes sobre la estructura son las gravitatorias y las aeroelásticas.

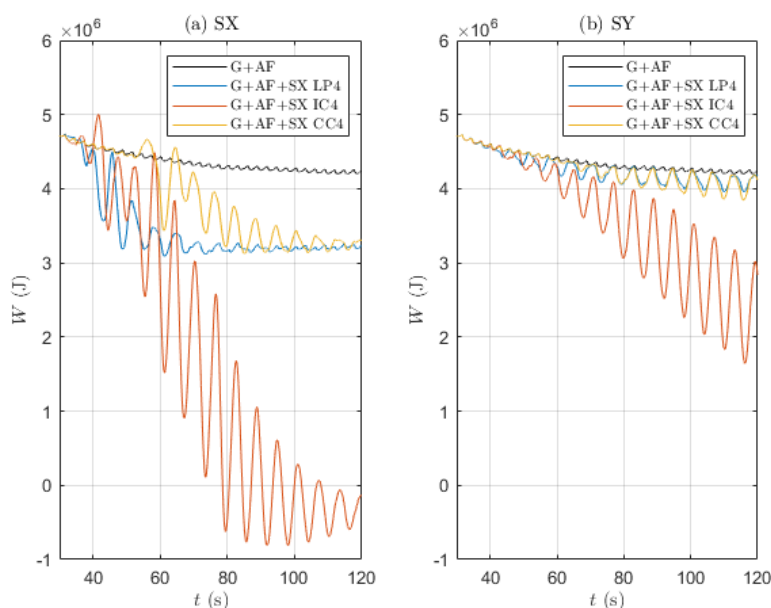


Figura 6. Trabajo total realizado por fuerzas aeroelásticas sobre las palas. (a) sismo en dirección x y (b) sismo en dirección y.

En la Figura 8 se muestran las mismas componentes de desplazamientos y giros pero para cuando el sismo se aplica en dirección y, es decir a 90 grados respecto a la dirección del viento.

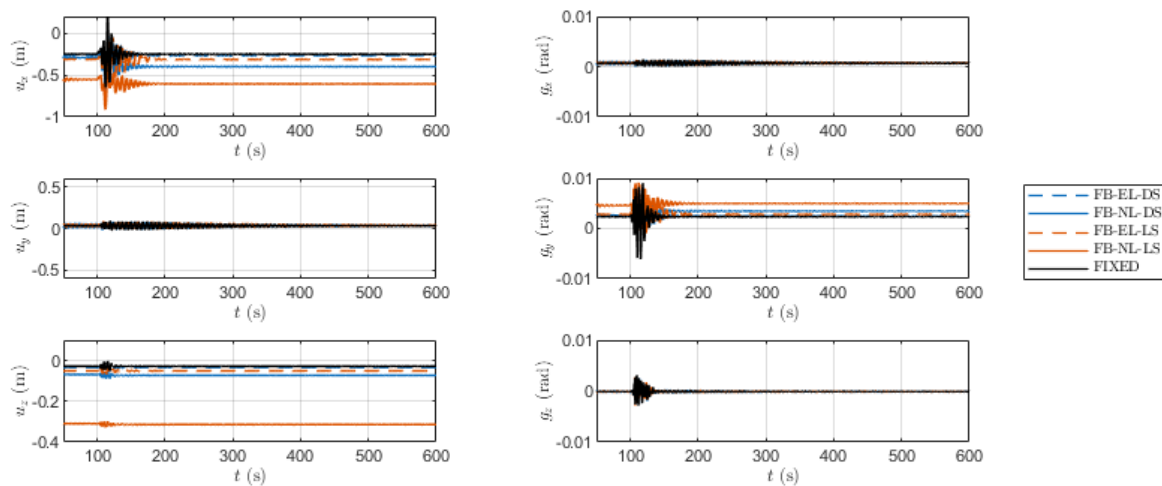


Figura 7. Desplazamientos de la góndola para base fija y flexible sometidas a sismo LP4 en dirección x.

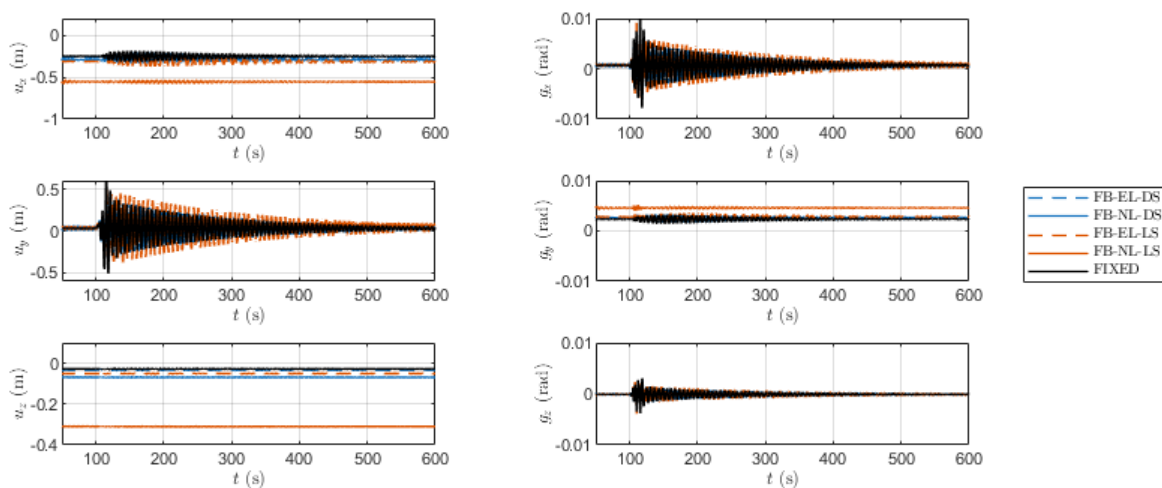


Figura 8. Desplazamientos de la góndola para base fija y flexible sometidas a sismo LP4 en dirección y.

A partir de las historias de desplazamientos y giros se observa que una vez transcurrido el sismo la estructura vuelve a las condiciones de operación normal para

ambas hipótesis de sismo. Sin embargo, para sismo actuando en la dirección-y el tiempo necesario para que esto ocurra es mayor que para el caso de sismo en dirección-x. Cabe recordar que la dirección-x es la dirección del viento.

Para sismo actuando en la dirección-x los mayores desplazamientos se dan en dirección-x y giros en dirección-y asociados al cabeceo de la góndola. Luego de la fase de excitación fuerte, los desplazamientos y giros se amortiguan rápidamente. Esto se debe a que en la hipótesis SX los modos involucrados en la respuesta estructural presentan una importante componente de deformación de las palas en dirección flapwise, lo que provoca un fuerte amortiguamiento aeroelástico. Para sismo actuando en la dirección y, las mayores componentes de desplazamientos se verifican en dirección-y y los giros máximos se verifican en dirección-x y en dirección-z. Esto se debe a que se involucran modos que acoplan la torsión de la torre con la flexión de las palas. Para esta hipótesis, el amortiguamiento aeroelástico es mucho menor que para sismo en dirección-x, debido a que las palas no son tan solicitadas en la dirección flapwise, sino que se vibran con mayor amplitud en dirección edgewise, lo que hace que el trabajo no conservativo de las cargas aerodinámicas sobre las palas sea menor.

Esto puede verse en la Figura 6, donde se muestra el trabajo total realizado por las cargas aerodinámicas sobre las palas para las tres señales consideradas y las dos hipótesis de sismos. Notar que las curvas comienzan con un valor no nulo para  $t=30s$ ; este el trabajo positivo acumulado durante las primeras etapas de simulación, hasta alcanzar al condición de funcionamiento en régimen. Dado que durante el sismo estas cargas quitan energía al sistema, el trabajo total acumulado hasta cada instante disminuye. Para sismo en dirección-x el trabajo total es mucho menor que para sismo en dirección y debido a que durante la fase de excitación fuerte del sismo, la vibración de las palas genera trabajo negativo sobre las estructuras, lo que se traduce en un mayor nivel de amortiguamiento.

| Model    | Sismo en x    |             |             |                  |               |             |             |                  |
|----------|---------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|
|          | $u_x t = 100$ | $\max(u_x)$ | $\min(u_x)$ | $u_x t = \infty$ | $u_y t = 100$ | $\max(u_y)$ | $\min(u_y)$ | $u_y t = \infty$ |
| FB-EL-AM | -0.266        | 0.199       | -0.648      | -0.266           | 0.034         | 0.083       | -0.015      | 0.034            |
| FB-NL-AM | -0.295        | 0.040       | -0.730      | -0.400           | 0.033         | 0.087       | -0.021      | 0.034            |
| FB-EL-AS | -0.314        | 0.073       | -0.658      | -0.314           | 0.037         | 0.080       | -0.007      | 0.037            |
| FB-NL-AS | -0.555        | 0.045       | -0.914      | -0.606           | 0.017         | 0.089       | -0.004      | 0.035            |
| FIXED    | -0.251        | 0.240       | -0.647      | -0.251           | 0.033         | 0.090       | -0.022      | 0.032            |

**Tabla 4 - Componentes de desplazamiento según ejes x e y para sismo LP4 en dirección x.**

| Model    | Sismo en y    |             |             |                  |               |             |             |                  |
|----------|---------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-------------|-------------|------------------|
|          | $u_x t = 100$ | $\max(u_x)$ | $\min(u_x)$ | $u_x t = \infty$ | $u_y t = 100$ | $\max(u_y)$ | $\min(u_y)$ | $u_y t = \infty$ |
| FB-EL-AM | -0.266        | 0.040       | -0.414      | -0.267           | 0.034         | 0.624       | -0.459      | 0.034            |
| FB-NL-AM | -0.295        | 0.040       | -0.478      | -0.295           | 0.033         | 0.518       | -0.330      | 0.042            |
| FB-EL-AS | -0.314        | 0.041       | -0.472      | -0.314           | 0.037         | 0.515       | -0.379      | 0.035            |
| FB-NL-AS | -0.555        | 0.045       | -0.714      | -0.555           | 0.017         | 0.313       | -0.098      | 0.073            |
| FIXED    | -0.251        | 0.040       | -0.393      | -0.251           | 0.033         | 0.661       | -0.508      | 0.033            |

*Tabla 5 - Componentes de desplazamiento según ejes x e y para sismo LP4 en dirección y.*

Las Tablas 4 y 5 resumen los valores de desplazamientos característicos de la góndola para el sismo LP4 cuando se aplica en dirección x e y respectivamente. Puede verse que al considerar la no-linealidad material en el suelo de fundación de la turbina eólica, induce deformaciones permanentes en las componentes de desplazamientos antes del sismo y luego del sismo.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló y evaluó un modelo mecánico para una torre eólica de gran tamaño y eje horizontal sometida a cargas sísmicas, operando bajo la acción combinada de su peso propio y las cargas aerodinámicas del viento. Para capturar adecuadamente el comportamiento del sistema, se incorporó la interacción suelo-estructura en las fundaciones, utilizando modelos con parámetros concentrados visco-elásticos lineales y no-lineales.

Los resultados obtenidos demuestran que las solicitaciones sísmicas provocan desplazamientos en la góndola significativamente mayores que los observados en condiciones de operación normal. Asimismo, se comprobó que la flexibilidad de la base de fundación altera la dinámica global de la estructura, disminuyendo las frecuencias naturales asociadas a los modos de flexión y torsión de la torre. Particularmente, al considerar la no-linealidad de la base, se observó una disminución en la amplitud de vibración posterior a la fase de excitación sísmica severa.

Por otro lado, se destacó que la respuesta estructural depende marcadamente de la dirección de aplicación del sismo debido a la interacción fluido-estructura. Cuando el sismo actúa en la misma dirección que el viento (eje x global), el amortiguamiento aeroelástico resultante es mayor que cuando incide de forma transversal (eje y global), lo que permite que las oscilaciones de la góndola converjan con mayor rapidez a los niveles de operación normal.

En futuras contribuciones se pretende avanzar en la modelación integral del problema completamente acoplado suelo-estructura-fluido, a fin de continuar demostrando el desempeño y las capacidades predictivas de esta herramienta sobre el comportamiento estructural completo de la turbina

## REFERENCIAS

- [1] Benz, T., Vermeer, P.A., and Schwab, R. A small-strain overlay model.

Organiza:

International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 33(1):25-44, 2009.

[2] Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P.G., et al. Plaxis 2016. PLAXIS bv, the Netherlands, pages 1-16, 2016.

[3] CIRSOC INPRES. Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte I (Parte 1), Construcciones en General, 2013.

[4] Flores, Fernando G. SIMPACT, An Explicit Finite Element Program. Departamento de Estructuras, U.N.C., 2011.

[5] Gebhardt, Cristian G. Desarrollo de simulaciones numéricas del comportamiento aeroelástico de grandes turbinas eólicas de eje horizontal. PhD thesis, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, 2012.

[6] Griffith, D Todd. The snl100-01 blade: carbon design studies for the sandia 100-meter blade. Sandia National Laboratories Technical Report, SAND2013-1178, 2013.

[7] Maunu, Pekka. Design of wind turbine foundation slabs, 2008.

[8] Maza, Mauro S., Preidikman, Sergio, and Flores, Fernando G. Unsteady and non-linear aeroelastic analysis of large horizontal-axis wind turbines. International journal of hydrogen energy, 39(16):8813-8820, 2014.

[9] Maza, Mauro S., Preidikman, Sergio, and Flores, Fernando G. A cost-effective algorithm for the co-simulation of unsteady and non-linear aeroelastic phenomena. Journal of Fluids and Structures, 118:103838, 2023.

[10] Preidikman, Sergio. Numerical Simulations of Interactions Among Aerodynamics, Structural Dynamics, and Control Systems. PhD thesis, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1998.

[11] Reglamento Argentino CIRSOC. 102, reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones, 2005.

[12] Simo, J. C. A finite strain beam formulation the three-dimensional dynamic problem. I. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 49:55-70, 1985.

[13] Simo, J.C. and Vu-Quoc, L. A three-dimensional finite-strain rod model. part II: computational aspects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 58:79-116, 1986.

[14] Svensson, Henrik. Design of foundations for wind turbines. 2010.