

RIGIDEZ DINÁMICA DE CIMENTACIONES TRIPILOTE PARA AEROGENERADORES MARINOS

Fidel García^{1*}, Guillermo M. Álamo², Luis A. Padrón², Juan J. Aznárez² y Orlando Maeso²

1: Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI).

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico. Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria. España.

e-mail: fidel.garcia@ulpgc.es web <http://www.siani.es>

2: Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI).

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico. Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria. España.

e-mail: guillermo.alamo103@alu.ulpgc.es, luis.padron@ulpgc.es, jjaznarez@siani.es, orlando.maeso@ulpgc.es web <http://www.siani.es>

Palabras clave: Propagación de ondas, métodos numéricos, dinámica estructural, estructuras pilotadas, rigidez dinámica, aerogeneradores.

Resumen: *En la ponencia se aborda el cálculo de la impedancia dinámica de una cimentación de tipo tripilote de un aerogenerador marino. En este tipo de problemas, los fenómenos de interacción suelo-estructura, consistentes en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la flexibilidad de éste, son especialmente relevantes. El cálculo se realiza haciendo uso de un modelo numérico tridimensional acoplado basado en el Método de los Elementos de Contorno y en el Método de los Elementos Finitos desarrollado en los últimos años por varios de los autores y que ya ha sido aplicado con éxito a otros problemas de interacción suelo-estructura y suelo-agua-estructura.*

Se ha estudiado la cimentación tripilote correspondiente a un aerogenerador offshore real. En estos primeros resultados, se analiza la influencia que la rigidez del suelo tiene en el comportamiento dinámico de ésta. Para ello, se presentan resultados de las funciones de impedancia vertical, horizontal y cabeceo para semiespacios (fondo marino) con diferentes propiedades.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien el desarrollo de la energía eólica offshore en España es escasa (la potencia actualmente instalada está en torno a 5 MW), en otros países Europeos existe una implantación

consolidada y en constante aumento. Según la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA, por sus siglas en inglés) [1] países como Reino Unido ya cuentan con 4.5 GW de potencia instalada, Dinamarca con 1.3 GW y Alemania con 1 GW. Si bien a finales de 2014, la potencia instalada de energía eólica offshore en la Unión Europea estaba en tono a los 8 GW, la EWEA estima que, si sigue la tendencia actual, se podrían alcanzar los 40 GW (4% de la demanda) en 2020, y los 150 GW (14% de la demanda) en 2030. A la vista de estos datos y de las expectativas futuras resulta evidente la importancia que esta tecnología va a tener en los próximos años.

Este creciente interés por los parques eólicos marinos es debido fundamentalmente a tres causas: 1.- Cada vez quedan menos emplazamientos en tierra con potencia eólica elevada, 2.- el menor impacto visual de los parques ubicados mar adentro y 3.- las mejores condiciones de viento en el mar. La rentabilidad de un parque eólico marino está fuertemente influenciada por la batimetría del emplazamiento debido a los mayores costes de la cimentación a medida que aumenta la profundidad. Los avances tecnológicos y la mejor comprensión de los problemas inherentes a la instalación en condiciones offshore de turbinas eólicas están permitiendo disminuir los costes de inversión, lo que está haciendo rentables instalaciones en profundidades que antes no eran viables económicamente.

Mientras el número de parques eólicos terrestres y marinos crece, surge con mayor frecuencia la necesidad de cimentar las estructuras en suelos de peores características, que pueden hacer inviable el uso de cimentaciones superficiales y que llevan en ocasiones a la utilización de cimentaciones profundas a base de pilotes. Según el informe de enero de 2015 de la EWEA, de las 2488 turbinas offshore instaladas y conectadas a red en la UE en 2014, la cimentación en el 78.8% de los casos se realizó mediante monopilotes, un 10.4% a base de cimentaciones de gravedad, un 4.7% mediante jackets, un 4.1% por trípodes y un 1.9% por tripilotes. La profundidad media de los emplazamientos de las turbinas instaladas en 2014 se situó en 22.4m.

El contexto descrito conlleva la necesidad de desarrollar modelos computacionales capaces de estimar las propiedades dinámicas de las cimentaciones mencionadas de manera más precisa y eficiente que en la actualidad, con el objetivo de contribuir a la obtención de diseños de estructuras de aerogenerador más óptimos, seguros, y de mayor vida útil, mejorando la rentabilidad de esta tecnología y abaratando el coste de la energía eólica.

Un correcto diseño de una turbina eólica debe hacerse bajo la premisa de que las frecuencias naturales de la estructura estén suficientemente alejadas de los espectros que definen el contenido en frecuencia de las principales cargas dinámicas presentes: giro del rotor, paso de las palas frente a la torre, viento y, en el caso marino, olas. (ver e.g. [2-4]). Un análisis preciso y adecuado en estos términos permite reducir la magnitud de las vibraciones inducidas en la estructura por estas cargas y, por tanto, alargar la vida útil de estos dispositivos (ver e.g. [5]). Las frecuencias naturales de la estructura dependen de las propiedades de rigidez e inercia del conjunto estructura-cimentación así como de los efectos de interacción suelo-estructura asociados al tipo de terreno y cimentación utilizada. Uno de los subsistemas que involucra mayor nivel de incertidumbre, y sobre el que habitualmente se hacen mayores simplificaciones en el cálculo, es el subsistema suelo-cimentación, sobre todo en el caso de cimentaciones profundas.

En trabajos muy recientes [6] se aportan datos experimentales sobre el comportamiento dinámico de aerogeneradores sobre monopilotes instalados en el mar y se observa que las frecuencias naturales calculadas a partir de ellos son, en ocasiones, más altas que las establecidas durante el proceso de diseño. La razón más probable de estas discrepancias está en la caracterización del comportamiento dinámico del conjunto cimentación-terreno. Se trata de un problema complejo debido, principalmente, a lo incierto de las propiedades de suelo (de carácter no homogéneo) y las dificultades asociadas al proceso de análisis de la respuesta dinámica del conjunto cimentación-terreno. Estas dificultades son mayores en el caso de tipologías de cimentaciones distintas del caso superficial, como son las cimentaciones pilotadas o los vasos de succión. Puede que precisamente por esto mencionado, también es interesante observar que los modelos empleados por muchos de los investigadores del ámbito son de una simplicidad que no se justifica en la mayoría de los casos (ver e.g. la revisión que sobre este particular realiza Zaaijer [7]).

El nivel de incertidumbre mencionado no justifica que no sea de interés la utilización (o aplicación) de modelos de mayor complejidad y rigor, como los desarrollados por el Grupo para otros problemas, y que permitan cuantificar los efectos de interacción dinámica suelo-estructura con mayor precisión. Frecuentemente la cimentación de aerogeneradores en el mar se realiza en terrenos blandos o con poca rigidez. En unos casos esta falta de rigidez se manifiesta en todo el espesor del lecho marino; en otras, existe un estrato a mayor profundidad con mayor rigidez sobre el que se asienta un terreno más blando. Es en estas situaciones con poca rigidez en las que estos fenómenos de interacción suelo-estructura son especialmente relevantes y su valoración debe realizarse con especial cuidado.

La impedancia o rigidez dinámica de una cimentación es una variable de gran interés para caracterizar el comportamiento dinámico de la misma y permite construir modelos simples (subestructuración) con el objetivo de determinar la respuesta dinámica de la estructura del aerogenerador ante cualquier carga. Se define como la relación entre una fuerza (momento) aplicada a una cimentación rígida carente de masa y el desplazamiento (rotación) resultante. En el caso de dinámica armónica las funciones de impedancia son números complejos, dependientes de la frecuencia ω , que relacionan tanto la magnitud como la fase de las fuerzas aplicadas a la cimentación con los desplazamientos resultantes. Para una excitación armónica los términos de la rigidez dinámica se expresan de la forma:

$$K_{ij} = k_{ij} + i\omega c_{ij} \quad (1)$$

donde k_{ij} y c_{ij} representan la rigidez y amortiguamiento de cada problema, respectivamente, e i la unidad imaginaria. Como ya se ha comentado, el interés en conocer la impedancia (rigidez+amortiguamiento) de la cimentación, radica en que con ella se podrá construir un modelo simple y realista del problema de cara al análisis dinámico del conjunto, sustituyendo el terreno por un resorte y un amortiguador en paralelo que representan más adecuadamente la interacción. La impedancia dependerá de las características del terreno y la cimentación.

En los resultados mostrados el cálculo de las impedancias se ha realizado utilizando un modelo 3D acoplado de elemento de contorno y elementos finitos formulado en el dominio de la frecuencia desarrollado por los autores, fruto del trabajo de varias décadas en la solución de problemas de dinámica estructural y propagación de ondas en medio elástico haciendo uso de

modelos numéricos desarrollados por ellos mismos. A lo largo de este tiempo, la metodología de base utilizada ha sido el Método de los Elementos de Contorno a través de códigos bi y tridimensionales que incorporan regiones de diferente naturaleza trabajando de forma acoplada. Estos modelos han permitido dar solución numérica a multitud de problemas de interés entre los que cabe citar los siguientes: 1.- Problemas de Interacción suelo-agua-estructura. Respuesta sísmica de presas bóveda [8-11], 2.- Problemas de Interacción suelo-estructura. Respuesta dinámica de estructuras de edificación pilotadas [12-15] y 3.- Problema de propagación de ondas acústicas. Estudio de la eficacia de pantallas anti-ruido [16-18]. En este caso, y para abordar el problema de interacción suelo-estructura que se aborda en este trabajo, el Método de los Elementos Finitos (MEF) se utiliza para modelar los pilotes y la estructura de transición entre los pilotes y la torre, mientras el suelo, considerado como un medio continuo, semiinfinito, isótropo y viscoelástico es modelado a través del Método de los Elementos de Contorno (MEC). El método aborda la solución del problema en el ámbito lineal. Si bien los efectos no lineales que pueden aparecer en el problema (tales como la posible licuefacción del terreno, la pérdidas de contacto o deslizamientos en la interfase pilote-suelo, etc.) pueden tener un peso importante en el comportamiento dinámico, el alto grado de desconocimiento existente aun hoy en día en relación a los efectos de interacción suelo-estructura, incluso en el rango lineal, justifica esta primera aproximación al problema. El modelo permite el tratamiento conjunto de todos los medios implicados en el problema dinámico y sus interacciones mutuas, la consideración natural y rigurosa de los medios con geometría infinita (e.g. suelo) y tener en cuenta el carácter espacial de la excitación elastodinámica (ondas sísmicas, vibraciones) y sus efectos sobre el problema a analizar. El modelo MEC-MEF aprovecha las fortalezas y evita las debilidades que ambos presentan en su aplicación por separado a la hora de ser aplicados a problemas como el que nos ocupa. Así el MEC, utilizado para modelar el suelo, aporta su gran ventaja a la hora de tratar regiones infinitas: frente a los Métodos de Dominio como el MEF, la formulación verifica de forma automática las condiciones de radiación en el infinito permitiendo un tratamiento numérico natural de estas regiones sin la incorporación de hipótesis simplificadoras. El uso del MEF para el modelado de los pilotes y de la estructura de transición mediante elementos tipo viga es natural y representa un importante ahorro en el número de grados de libertad del problema respecto del modelado sólido. Debido a las diferencias entre ambos Métodos, la dificultad matemática está en la formulación e implementación general de las ecuaciones de acoplamiento suelo-pilote (para consultar detalles ver e.g. [13]).

2. PROBLEMA ESTUDIADO Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CIMENTACIÓN

El análisis se ha realizado tomando como base el proyecto denominado BARD 5.0 desarrollado por la empresa BARD Engineering GmbH [19]. Consiste en una turbina con rotor tripala de 122m de diámetro con una potencia nominal aproximada de 5,2 MW. La altura total y del eje de la máquina sobre el agua son 152m y 90m respectivamente. El proyecto está previsto para ser instalado en aguas con profundidades comprendidas entre 25 y 40 m consistiendo la cimentación en tres pilotes simétricamente distribuidos inscritos en una

circunferencia de 26m de diámetro aproximado y longitudes variables comprendidas entre 80 y 115m en función de la profundidad del emplazamiento de la máquina. Parte de estos pilotes emergen del agua uniéndose a la torre de la máquina mediante una estructura de transición que queda completamente fuera del agua.



Figura 1. Fotografías de la instalación de una máquina BARD 5.0 (tomadas de <http://www.geniusstrand.de/>)

Las principales características del conjunto obtenidas de [19] se resumen en la siguiente tabla:

Turbina	
Diámetro del rotor	122 m
Potencia nominal	5276,2kW
Masa de la góndola	280 t
Altura del eje sobre el agua	90 m
Altura total sobre el agua	152 m
Masa de la estructura en cruz de transición	490t
Altura de la parte emergida hasta la base de la torre	21m
Torre y estructura de transición	
Altura de la torre	63m
Diámetro en la base de la torre	6.5m
Diámetro en punta de la torre	5.5m
Masa de la torre	450t
Masa de la estructura de transición	490t
Pilotes	
Longitud	80-121m
Diámetro	3.35m
Masa	420t

Tabla 1. Resumen de las principales características del proyecto BARD 5.0

El trabajo aquí presentado aborda el cálculo de la impedancia de la cimentación de este

proyecto. Con el fin de completar el modelo, se han realizado una serie de hipótesis en relación a la geometría y propiedades de los materiales y del suelo, bajo la premisa de reflejar una situación real de instalación. La estructura de transición y los pilotes se han considerado realizados a base de perfiles tubulares de acero con espesor uniforme con las siguientes propiedades: Densidad $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$, módulo de elasticidad $E = 210000 \text{ MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.25$ y coeficiente de amortiguamiento interno $\xi = 0.02$. Tal y como se observa en la figura 2 se ha supuesto una longitud total de cada uno de los pilotes de 118m, 60 de los cuales se encuentran embebidos en el lecho marino, 40 sumergidos en el agua y 18 fuera de ésta. El punto central de unión de las tres barras de la estructura de transición y la torre del aerogenerador, se ha situado 3m sobre la punta emergida de los pilotes. Este punto, coincidente con el origen de coordenadas, es en que se han calculado las impedancias mostradas en el apartado de resultados.

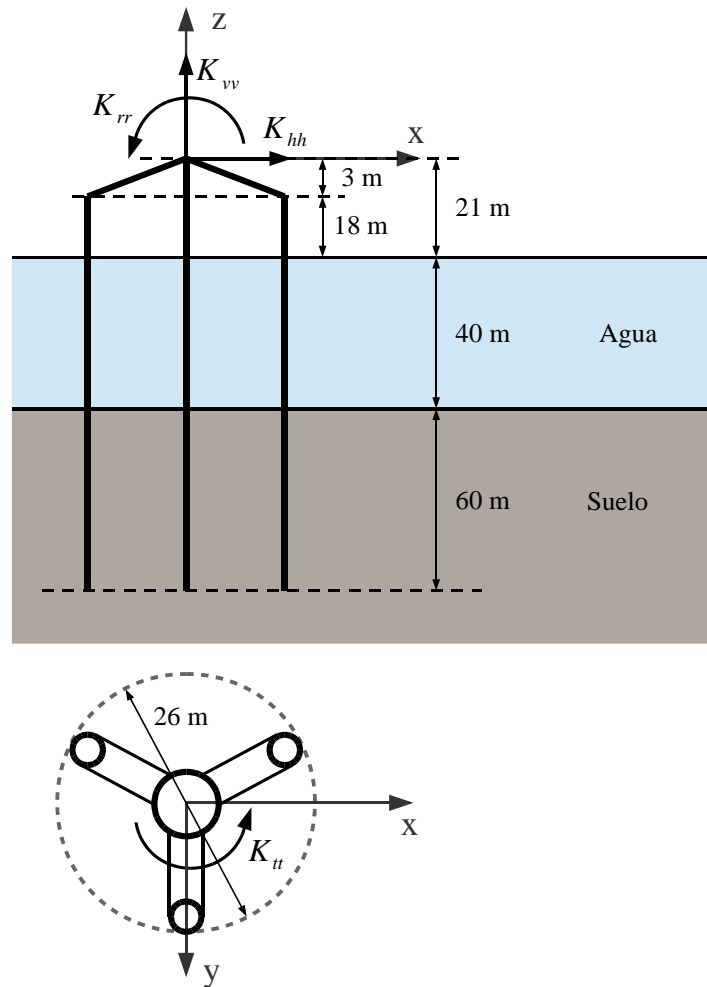


Figura 2. Modelo de la cimentación y de la estructura de transición

Los espesores de los distintos elementos se han calculado a partir de su masa y diámetro exterior. En la tabla 2 figuran las dimensiones adoptadas.

Elemento	Longitud	ϕ_{exterior}	Espesor
Elementos de la estructura de transición	11.71m	3.35m	9.5cm
Pilotes	100m	3.35m	5cm

Tabla 2. Geometría de los elemento empleados para definir el modelo

En relación al suelo se han considerado tres tipos con diferente rigidez para ver la influencia de ésta sobre la impedancia; las propiedades han sido tomadas de [20]. Densidad $\rho_a = 1700 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.35$, coeficiente de amortiguamiento interno $\xi = 0,05$ y módulos de elasticidad $E_{s1} = 45.9 \text{ MPa}$, $E_{s2} = 286.9 \text{ MPa}$, $E_{s3} = 734.4 \text{ MPa}$, correspondiente a velocidades de propagación de las ondas de corte $c_s^{s1} = 100 \text{ m/s}$, $c_s^{s2} = 250 \text{ m/s}$, $c_s^{s3} = 400 \text{ m/s}$ respectivamente.

3. RESULTADOS

Los resultados mostrados corresponden a las impedancias horizontales (K_{hh}), verticales (K_{vv}), de cabeceo (K_{rr}), cruzadas (K_{rh}) y a torsión (K_{tt}) resultantes en el punto de unión de la torre con la estructura de enlace con la cimentación. Para cada caso se presentan gráficos correspondientes a la rigideces (k_{ij}) al amortiguamientos (wc_{ij}) y al valor absoluto de la impedancia frente a la frecuencia en Hz. En los gráficos se han denominado $\text{Re}(K_{ij})$, $\text{Im}(K_{ij})$, $\text{Abs}(K_{ij})$ respectivamente. Con el fin de poder ver mejor los resultados, se han dividido los valores correspondientes a una variable en dos columnas. La de la izquierda muestra los valores para un rango de frecuencias comprendida entre 0 y 2Hz y la de la derecha para un rango entre 2 y 8Hz; las escalas de los eje de ordenadas se han adecuado al valor de la magnitud representada. En cada uno de los gráficos se presentan cuatro curvas: Tres correspondientes a los tres suelos ya comentados anteriormente con distintas rigideces ($c_s^{s1} = 100 \text{ m/s}$, $c_s^{s2} = 250 \text{ m/s}$, $c_s^{s3} = 400 \text{ m/s}$); la cuarta muestra el comportamiento de la cimentación ante el caso teórico de fondo marino infinitamente rígido. A la vista de las curvas se puede concluir lo siguiente:

1. En el rango de frecuencias bajas, (las de verdadero interés teniendo en cuenta la frecuencia natural de la estructura y de las cargas) para todos los suelos estudiados la rigidez horizontal y a torsión es muy dependiente de la frecuencia, cambiando de signo en todos los casos en una frecuencia entorno a 0.8 Hz.
2. Esta variación con la frecuencia no se produce en el caso de la rigidez vertical y de cabeceo (ambas vinculadas a los axiles en los pilotes del grupo) si bien en el suelo más blando ($c_s = 100 \text{ m/s}$) se aprecia una mayor variabilidad con la frecuencia. Por ello, puede aceptarse

que a baja frecuencia se emplee la rigidez estática de ambos problemas para analizar el comportamiento dinámico del conjunto cimentación-estructura.

3.- Como es de esperar en todos los casos (horizontal, vertical y cabeceo), la rigidez del grupo se incrementa para valores crecientes de la c_s del semiespacio que representa el fondo marino.

4.- Las frecuencias naturales de la cimentación quedan bien identificadas por los mínimos del módulo de la impedancia. Especial atención requiere el caso horizontal en el que para el rango de frecuencias estudiado (entre 0 y 8Hz) se pueden identificar tres mínimos; el primero (situado en la franja 0.7-0.8Hz) y el tercero (situado en la franja 3.5-4.2Hz) se corresponden con frecuencias naturales del problema de flexión; el segundo (situado en la franja 2.7-3.2Hz) con una frecuencia asociada a un modo acoplado flexión-torsión. Como es lógico las frecuencias naturales están determinadas por las propiedades de la porción que se encuentra por encima del fondo marino (parte sumergida de los pilotes + estructura por encima de la superficie).

5.- Como era de esperar, en relación con el modelo de fondo rígido, estas frecuencias se desplazan hacia frecuencias más bajas cuando existen fenómenos de interacción suelo-estructura, de forma más acusada a medida que la rigidez del fondo se reduce.

6.- Los valores máximos de la respuesta también se ven minorados a medida que el fondo se flexibiliza. Así, para el caso horizontal, en relación con la situación infinitamente rígida, los valores máximos se ven reducidos en un 20%, 30% y 70% para valores de $c_s = 400, 250$ y 100 m/s respectivamente.

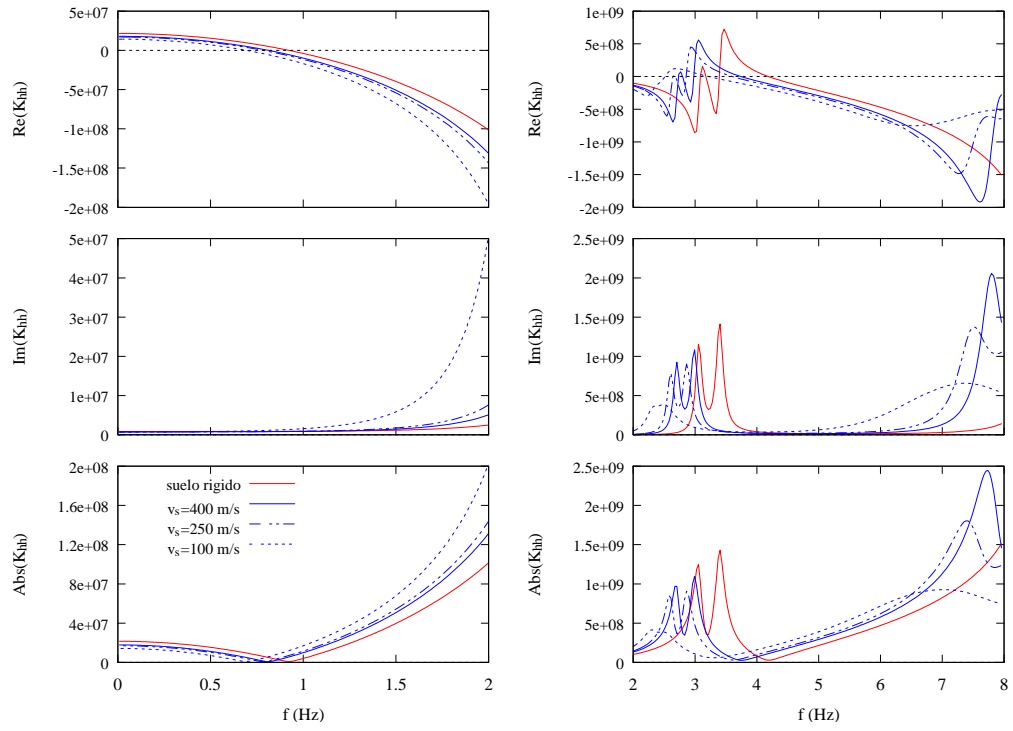


Figura 3. Impedancia horizontal (K_{hh})

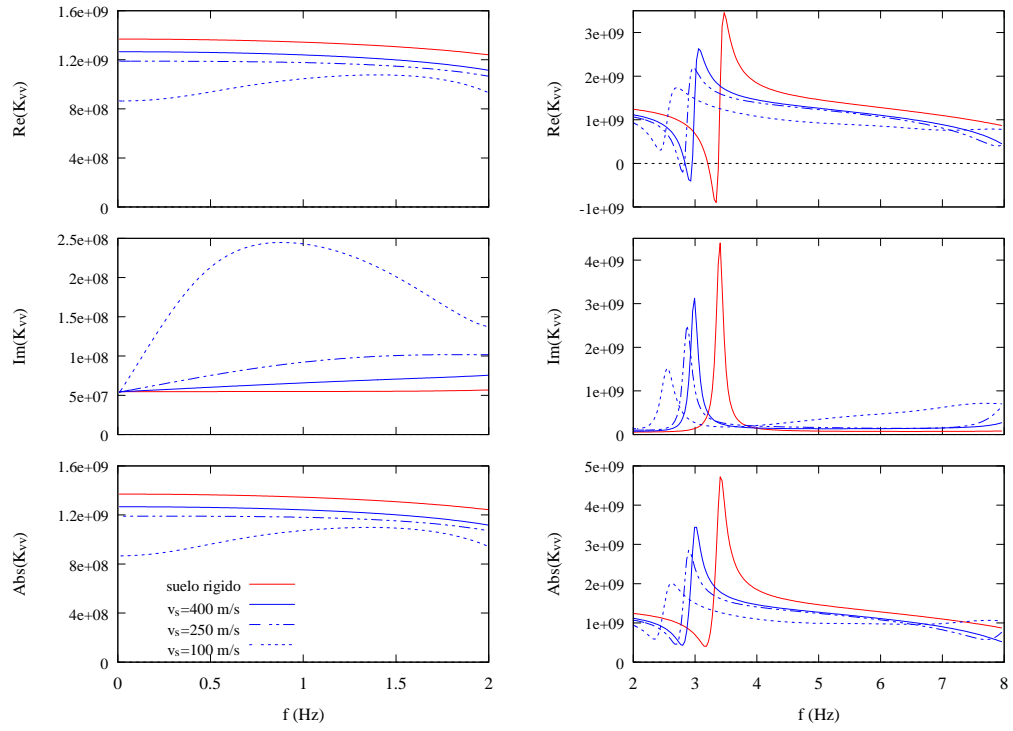


Figura 4. Impedancia vertical (K_{vv})

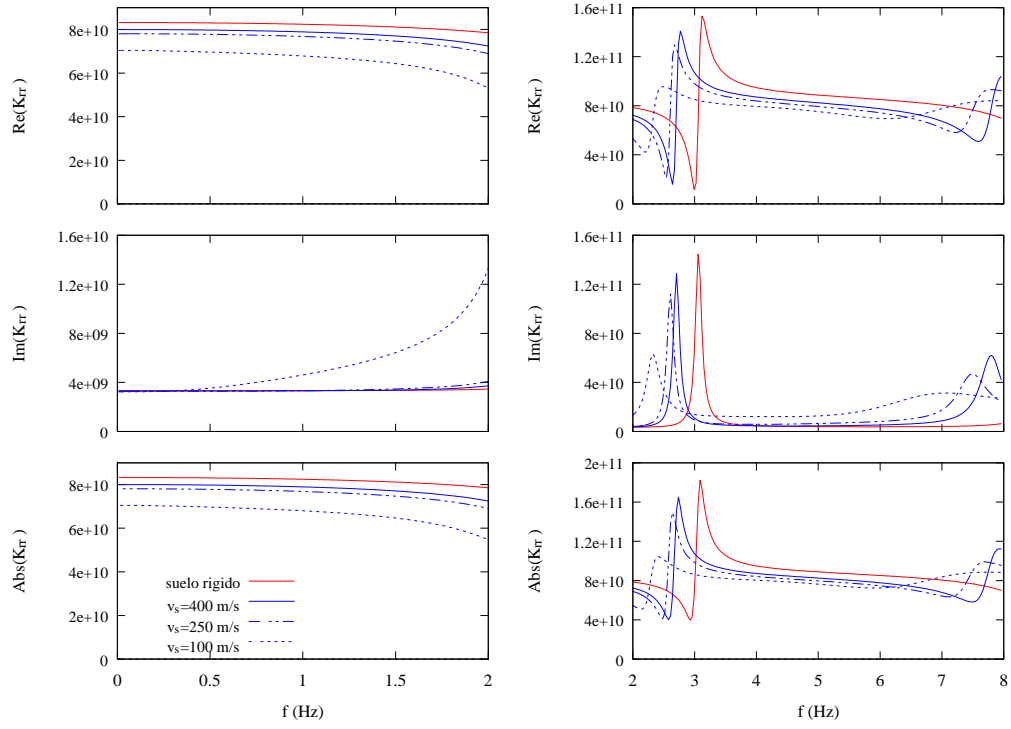


Figura 5. Impedancia de cabeceo (K_{tr})

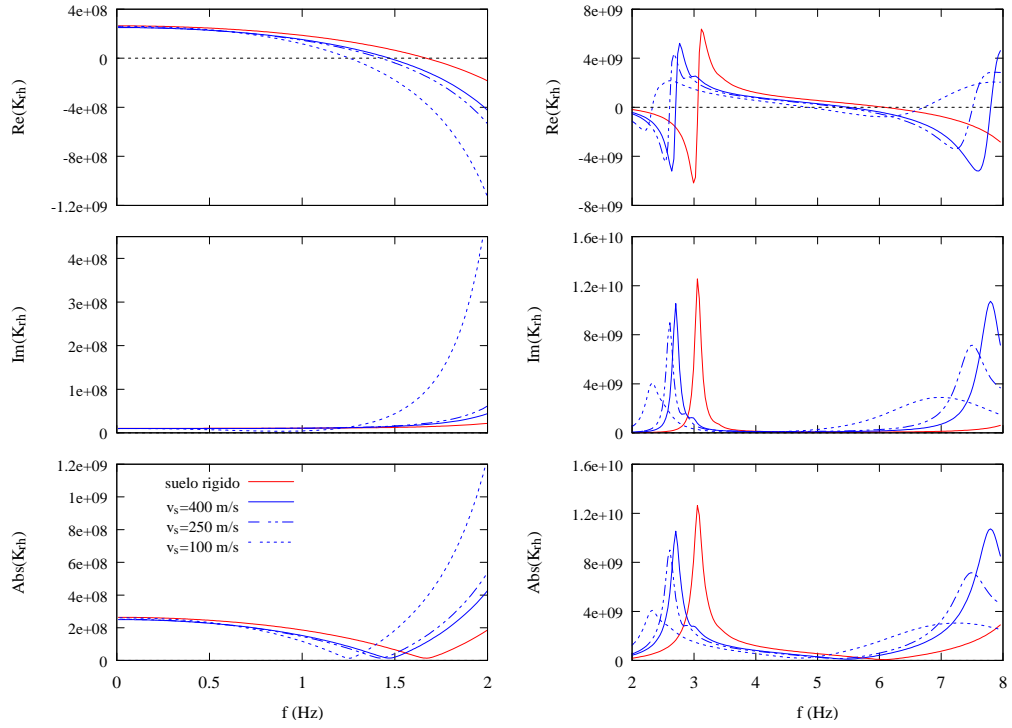
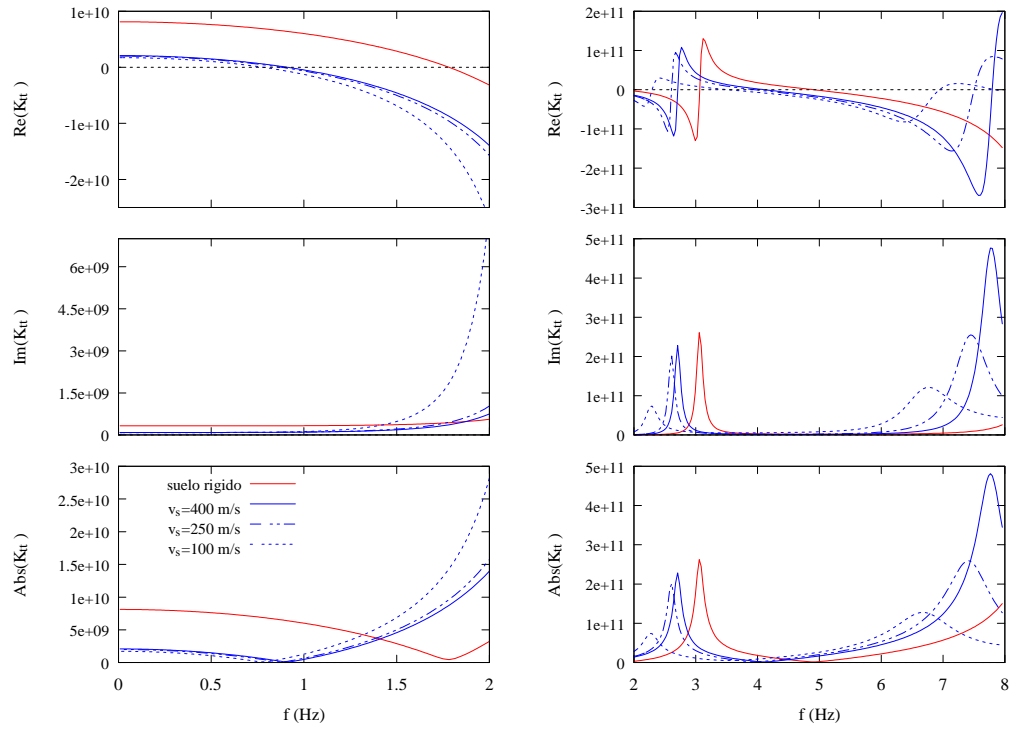


Figura 6. Impedancia cruzada (K_{th})

Figura 7. Impedancia a torsión (K_{tt})

4. CONCLUSIONES

Se han presentado resultados de las impedancias dinámicas de una cimentación de tipo tripilote destinada a un aerogenerador marino. El cálculo se ha realizado haciendo uso de un modelo numérico tridimensional acoplado basado en el Método de los Elementos de Contorno y en el Método de los Elementos Finitos. El suelo, considerado como un medio continuo, semiinfinito, isótropo y viscoelástico, es modelado a través del MEC. Los pilotes y la estructura de transición se modelan mediante el MEF a base de elementos tipo viga. Para ver la importancia de los fenómenos de interacción suelo-estructura se han contrastado los resultados correspondientes a tres tipos de fondos marinos con la hipótesis de infinita rigidez del mismo.

Del análisis de los resultados mostrados se concluye la fuerte dependencia del comportamiento dinámico de la cimentación con la rigidez del suelo. Como cabía esperar, las frecuencias naturales se desplazan hacia frecuencias más bajas a medida que se flexibiliza el suelo. Los valores máximos de la respuesta también se ven minorados a medida que el fondo tiene menos rigidez. Las impedancias horizontales y a torsión son las que mayor sensibilidad presentan con la frecuencia, especialmente en el rango de bajas frecuencias (0-2Hz). La vertical y la de cabeceo pueden quedar relativamente bien caracterizadas a bajas frecuencias por sus valores estáticos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está vinculado al proyecto de investigación precompetitivo ULPGC2013-08 financiado por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria dentro del programa de ayudas a la investigación convocatoria 2013.

REFERENCIAS

- [1] EWEA. European Wind Energy Association. The European offshore wind industry - key trends and statistics 2014 (2015).
- [2] Bhattacharya S, Cox J y Lombardi D (2013). "Dynamics of offshore wind turbines on two types of foundations". ICE Proc of the Institution of Civil Engineers: Geotech Eng.
- [3] Bhattacharya S, Nikitas N, Garnsey J, Alexander NA, Cox J, Lombardi D, Muir Wood D, y Nash DFT (2013) "Observed Dynamic Soil-Structure Interaction in scale testing of Offshore Wind Turbine Foundations". Soil Dyn Earthq Eng. 54, 47-60.
- [4] Domenico Lombardi, Subhamoy Bhattacharya, DavidMuirWood (2013). "Dynamic soil-structure interaction of monopole supported windturbines in cohesive soil". Soil Dynamics and Earthquake Engineering.49, 165-180.
- [5] "Guidelines for design of wind turbines", Der Norske Veritas, Copenhagen and Wind Energy Department, RisØ National Laboratory (2009).
- [6] Versteijlen WG, van Dalen KN, Metrikine AV, Hamre L (2014) "Assessing the small-strain soil stiffness for offshore wind turbines based on in situ seismic measurements". Proceedings of EURODDN 2014, Porto (Portugal).
- [7] Zaaier MB (2006). "Foundation modeling to assess dynaic behaviour of offshore wind turbines". Appl Ocean Res. 28, 45-57.
- [8] Maeso O, Aznárez JJ y Domínguez J (2002). "Effects of the space distribution of the excitation on the seismic response of arch dams". J Eng Mech. 128, 759-768.
- [9] Maeso O, Aznárez JJ y Domínguez J (2004). "Three dimensional models of reservoir sediment and effects on the seismic response of arch dams". Earthqu Eng Struct Dyn. 33, 1103-1123.
- [10] Aznárez JJ, Maeso O y Domínguez J (2006). "BE analysis of bottom sediments in dynamic fluid-structure interactions problems". Eng Anal Bound Elem. 30, 124-136.
- [11] F.García, J.J.Aznárez, H.Cifuentes, F.Medina, O.Maeso (2014). "Influence of reservoir geometry and conditions on the seismic response of arch dams". Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 67, 264-272.
- [12] Maeso O, Aznárez JJ y García F (2005). "Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils". Comput Struct. 83, 769-782.
- [13] Padrón LA, Aznárez JJ y Maeso O (2007). "BEM-FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups". Eng Anal Bound Elem. 31, 473-484.
- [14] Padrón LA, Aznárez JJ, Maeso O y Santana A (2010). "Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles". Earthq Eng Struct Dyn. 39, 1343-1367.
- [15] Padrón LA, Aznárez JJ, Maeso O y Saitoh M (2012). "Impedance functions of end-bearing inclined piles". Soil Dyn Earthq Eng. 38, 97-108.

- [16] Maeso O y Aznárez JJ (2005). "Estrategias para la reducción del impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del MEC". ULPGC
- [17] Toledo R, Aznárez JJ, Maeso O y Greiner D (2013). "A comparative study on design optimization of polygonal and Bézier curve-shaped thin noise barriers using dual BEM formulation". Proceedings of EUROGEN-2013. Las Palmas de GC, España.
- [18] Toledo R, Aznárez JJ, Maeso O y Greiner D (2015). "Optimization of thin noise barrier designs using Evolutionary Algorithms and a Dual BEM formulation". J Sound Vib. (en prensa).
- [19] BARD Engineering GmbH . <http://www.bard-offshore.de>.
- [20] M. Damgaard, V. Zania, L.V Andersen, L.B. Ibsen (2014) "Effects of soil–structure interaction on real time dynamic response of offshore wind turbines on monopoles". Engineering Structures. 75, 388-401.