

05-013

DESIGN OF A FLOATING WIND TURBINE WITH AN ARTICULATED CONCRETE TOWER.

Alvarez Barroso, Juan ¹; Díez Minguito, Manuel ²; Jadraque Gago, Eulalia ²

¹ Universidad de Granada, ² E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Universidad de Granada

Offshore wind energy began its development in early 2000, in coastal countries of the North Sea, having a marked success due to its environmental advantages as well as the plenty and steady wind resource that it provides. Current foundation systems, mono-pile and jacket, are suitable in shallow waters, under 60 m depth. For deeper sea locations, floating structures can be a possible solution. The objective of this work is to design a high-efficiency wind turbine supported by a floating-platform, what can be moored in deep-water, and assembled by a simple process. Post-tensioned concrete has been considered in the design due to its strength and durability, likewise an articulated union nacelle-tower, in order to reduce the oscillation produced by waves and wind. Moreover, a single mooring system allows the structure (platform & turbine) to be orientated in the wind provenance direction. The structure is proposed to be dry-assembled, to reduce manufacturing costs and improve manufacturing performance. To check the design, simulations of structure have been run for extreme wind and wave values, and their outputs have been the starting point to the tower dynamic structural calculation.

Keywords: *offshore;turbine;floating;post-tensioned;simulation*

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR FLOTANTE CON ESTRUCTURA ARTICULADA DE HORMIGÓN

La energía eólica marina comenzó a instalarse a principios del 2000, en países ribereños del Mar del Norte, teniendo un notable desarrollo por sus ventajas medioambientales y la gran disponibilidad y estabilidad del recurso eólico. Los sistemas actuales de cimentación, monopilote y metálico, sólo son aplicables en zonas someras, con profundidades menores a 60 m. Para zonas con mayor profundidad, una posible solución son las estructuras flotantes. El objeto de este estudio es diseñar un aerogenerador sobre plataforma flotante, que pueda ser instalado en profundidades indefinidas, con un óptimo rendimiento productivo, y de fabricación sencilla. Para el diseño, se emplea una estructura de hormigón postesado, por su resistencia y durabilidad, y una unión articulada fuste-turbina para mitigar las oscilaciones inducidas por viento y oleaje. Se propone un fondeo mono-cabo para que la estructura se auto-oriente en la dirección de procedencia del viento. Se plantea la construcción en seco, para reducir costes de ensamblaje y mejorar el rendimiento. En la etapa de verificación, se han realizado simulaciones de la estructura en el emplazamiento, frente a estados de mar y viento extremos. A partir de los resultados del modelo, se ha realizado un cálculo de la estructura del fuste en condiciones dinámicas.

Palabras clave: *Aerogenerador;marino;flotante;postesado;modelo*

Correspondencia: Juan Alvarez Barroso juanalvbar@gmail.com

1. Introducción

La energía eólica marina es una tecnología que nació como evolución de la eólica terrestre. Las ventajas que este sistema de producción presenta frente a su predecesor pueden resumirse en los siguientes (Solé, 2008):

- Calidad del recurso eólico. Comparado con el medio terrestre, el medio marino presenta en general un régimen de vientos caracterizado por una mayor velocidad media, así como por una menor intensidad de turbulencias. Esto resulta en un mayor rendimiento de la producción.
- Gran disponibilidad de espacios. La escala espacial de los emplazamientos marinos es en general mayor a la de las ubicaciones en tierra.
- Posibilidad de menor impacto visual. En principio, el impacto visual de los parques marinos viene determinado por la distancia de estos a la costa. Por lo tanto, a medida que un parque se aleja de la costa se va haciendo menos visible desde tierra.

Por otra parte, esta tecnología presenta una serie de desventajas:

- Cimentaciones especiales. El fondeo de los molinos en el fondo marino suele ser complicado, desde el punto de vista técnico y económico.
- Transporte de la energía. La evacuación de la energía desde el parque a la red eléctrica de tierra suele conllevar grandes pérdidas de energía, que hacen necesaria la construcción de centrales de transformación en el mar para hacer el transporte en alta tensión.

Pese a estas desventajas, la energía eólica marina es una tecnología que ha sido ampliamente instalada en los países ribereños del Mar del Norte, desde principios de la década del 2000. Este mar, tiene una profundidad media reducida, en torno a los 35 m, lo cual ha permitido la instalación de molinos con cimentaciones tradicionales:

- Gravedad. Hasta 15 m de profundidad
- Monopilote. Hasta 30 m de profundidad.
- Trípode. Hasta 40 m de profundidad.
- Jacket. Estructuras metálicas propias de la industria petrolífera. Hasta 60 m de profundidad.

Para mayores profundidades, una posible solución pasa por el desarrollo de plataformas flotantes, las cuales permitirían el anclaje de la turbina a casi cualquier profundidad.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es diseñar y verificar un aerogenerador sobre plataforma flotante, que permita la instalación de un parque eólico en cualquier emplazamiento marino independientemente de la profundidad del fondo.

Para abordar esta tarea de una forma más práctica, se ha elegido una ubicación real en la que proyectar la obra: Se trata del Golfo de Cádiz, una zona del litoral cuya alta disponibilidad de recurso eólico es ampliamente conocida.

3. Metodología

3.1 Ubicación

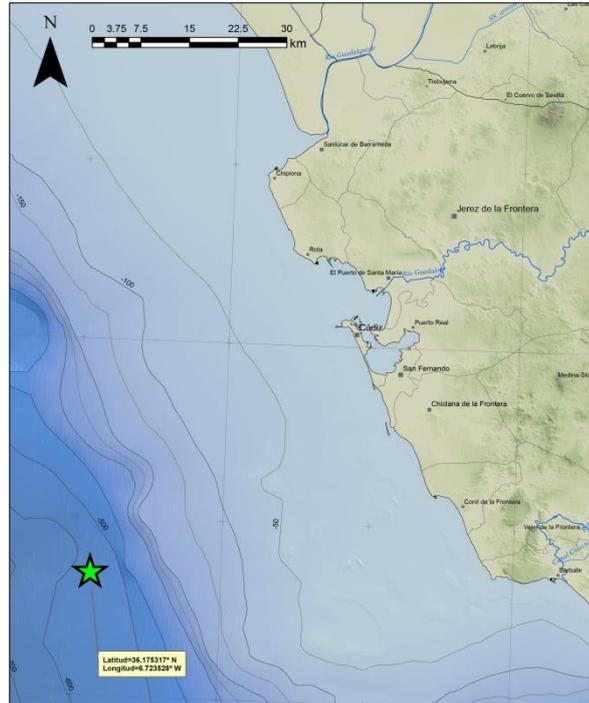


Figura 1: Ubicación elegida en el Golfo de Cádiz.

Se parte de la ubicación ilustrada en la Figura 1, a 51 km frente a la costa de Cádiz. Para la elección de la ubicación de han tenido en cuenta diversos criterios, entre los que cabe destacar:

- Impacto visual. Se lleva a cabo un estudio de la curvatura terrestre en la zona de estudio, y se determina la distancia a la que hay que llevar el parque para que los molinos no sean divisibles desde tierra.

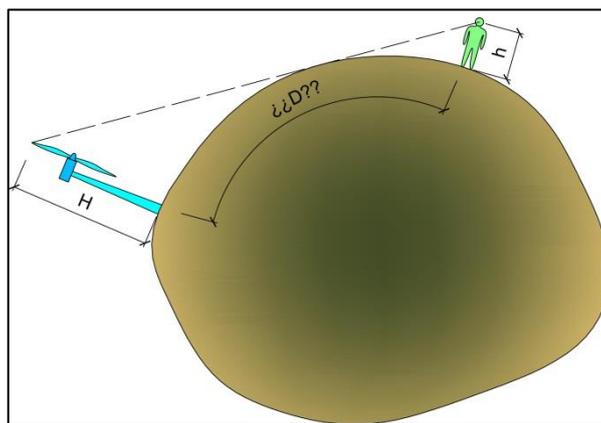


Figura 2: Planteamiento del problema geométrico.

- Interferencia con el tráfico marítimo. Se impide que el parque sea un obstáculo para la navegación alejándolo de las principales rutas marítimas.

3.2 Diseño propuesto

Se parte de un diseño general del molino, que será el punto de partida para el proceso de verificación. Se trata de un molino sobre plataforma flotante prismática, ambos constituidos de piezas prefabricadas de hormigón postesado. Se pueden destacar las principales características del mismo:



Figura 3: Vista general del molino diseñado.

- Unión articulada fuste-turbina. Las oscilaciones que el oleaje induce en la estructura podrían provocar una pérdida de rendimiento energético. Interponiendo una rótula entre el fuste y la turbina, se logra independizar el giro de ambos componentes y se mitiga la amplitud de las oscilaciones del rotor.

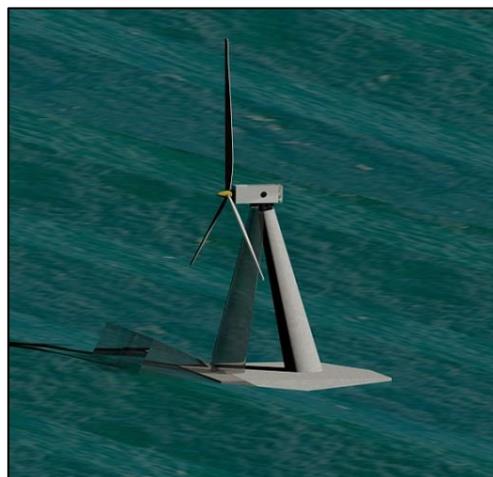


Figura 4: Unión articulada en la estructura del molino.

- Estructura de hormigón postesado. Utilizando este material se consigue una óptima resistencia con secciones mínimas, además de prevenir la corrosión en las armaduras por el ataque del medio marino.

- Fondeo monocabo. Consiste en una sola línea de fondeo del molino, que permite que este se direcciona automáticamente en la dirección de procedencia del viento, prescindiendo de mecanismos de orientación como los que tienen los molinos en tierra.

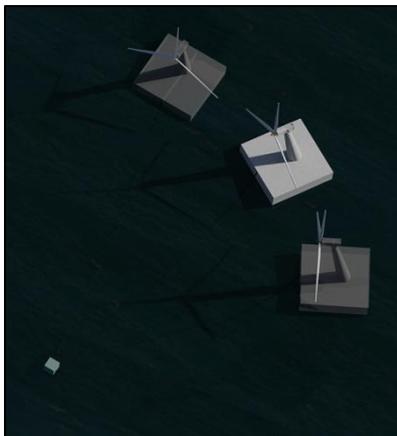


Figura 5: Sistema de fondeo monocabo

3.3 Proceso constructivo

Se propone la construcción en la planta Navantia Puerto Real. Es un astillero naval que dispone de un dique de carena, así como de grúas pórtico, que permitirían acometer la construcción totalmente en seco, reduciendo previsiblemente los costes del proyecto comparándolos con los que supondría la construcción de una cimentación en el mar.

Los molinos se construyen totalmente en el dique seco, en lotes de cinco unidades. Una vez se hallan los cinco terminados, un remolcador asume la tarea de transportarlos hasta el emplazamiento para proceder al fondeo de los mismos.



Figura 6: Infografía de la construcción de los molinos en el dique seco de la planta Navantia Puerto Real, a 65 km. de la ubicación del parque.

3.4 Verificación

Se trata de comprobar que el molino diseñado cumple con los requerimientos que se le exigen. Para ello, se consideran cinco modos de fallo ante los que hay que verificar el molino:

- Fallo por choque con de las palas con el fuste. Este fallo ocurre cuando las oscilaciones del molino en un determinado estado de mar son tan fuertes que las palas impactan con el fuste.



Figura 7: El fallo ocurre cuando la oscilación del molino sobrepasa los 0.47 Rad.

Para conocer los movimientos del molino en un determinado estado de mar, se programa un modelo numérico que simule su comportamiento.

Dada la simetría del problema, se considera el molino como un sólido rígido con movimiento plano, i.e., con dos grados de libertad. Se plantean las ecuaciones fundamentales del movimiento y se resuelven por el método numérico de Runge-Kutta de orden 4 (Patel & Witz, 2013).

Para modelizar las acciones exteriores sobre la estructura, se considera la acción del viento como una fuerza distribuida, aceptando la expresión clásica de la presión dinámica, y considerando el perfil logarítmico de velocidades. La acción del agua se modela por medio de las fuerzas de Froude-Krilov, admitiendo que la profundidad en el emplazamiento es tan grande en comparación con el calado de la obra que puede representarse dicha acción por medio de la teoría lineal del oleaje sin incurrir en un gran error (Chakrabarti, 2001).

Para un determinado estado de mar, se simula el movimiento del molino durante un intervalo de tiempo de 90 s., tiempo suficiente para que el comportamiento del mismo comience a repetirse, y quede registrada la amplitud máxima del giro de la estructura para ese estado de mar.

Para la verificación se dispone de un registro de oleaje de la red SIMAR de Puertos del Estado que contiene mediciones desde el año 1958 hasta la actualidad. La comprobación consiste en simular el comportamiento del molino en los estados de mar extremos registrados, para ver que el giro máximo producido no alcanza el valor que provoca el fallo.

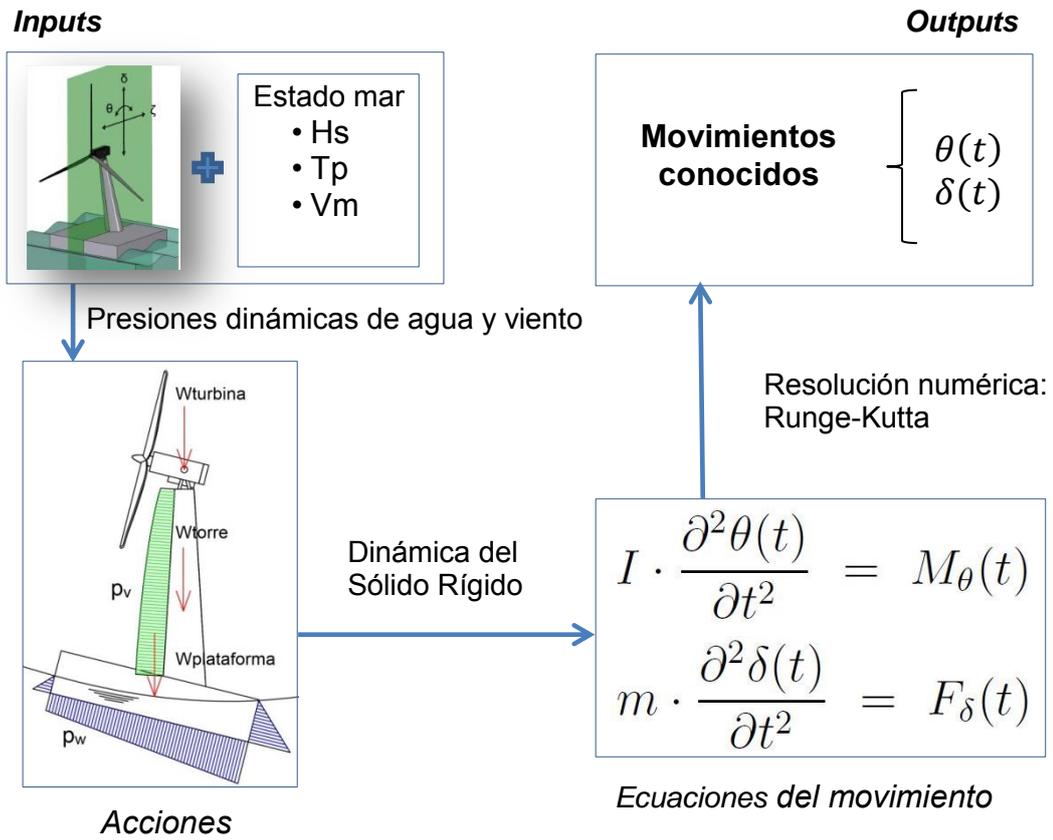


Figura 8: Esquema general del modelo dinámico. Se parte de un determinado estado de mar, caracterizado por una altura de ola, un periodo de oleaje y una velocidad del viento. El resultado de la simulación es el movimiento del molino en el tiempo.

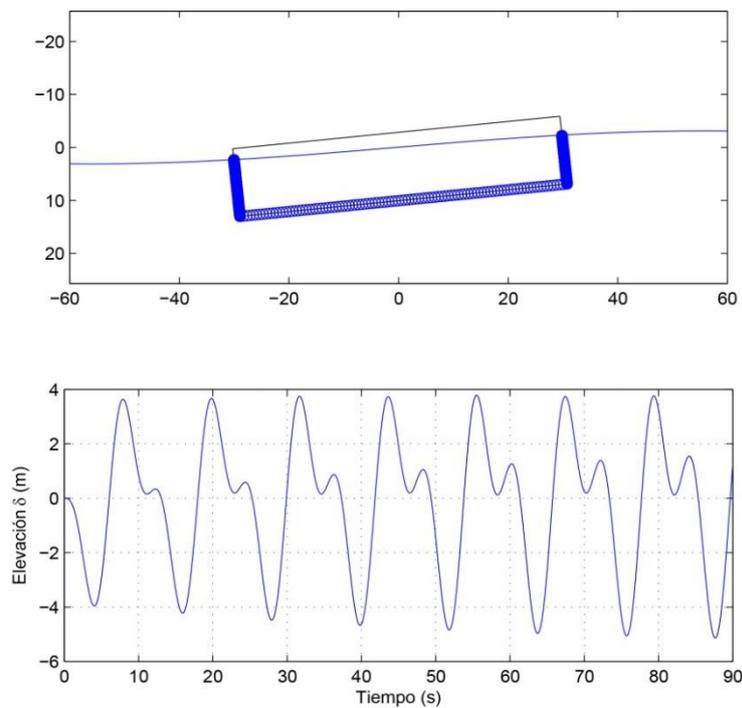


Figura 9: En la simulación de un determinado estado de mar, se almacena el valor máximo del giro de la estructura.

- Fallo por agotamiento resistente a flexión-compresión del fuste. Se considera el fuste como un elemento barra, y se calculan los esfuerzos en el mismo a partir de los resultados del modelo dinámico antes mencionado. Se consideran las acciones exteriores del agua y el viento, además de la acción gravitatoria y las fuerzas de inercia.

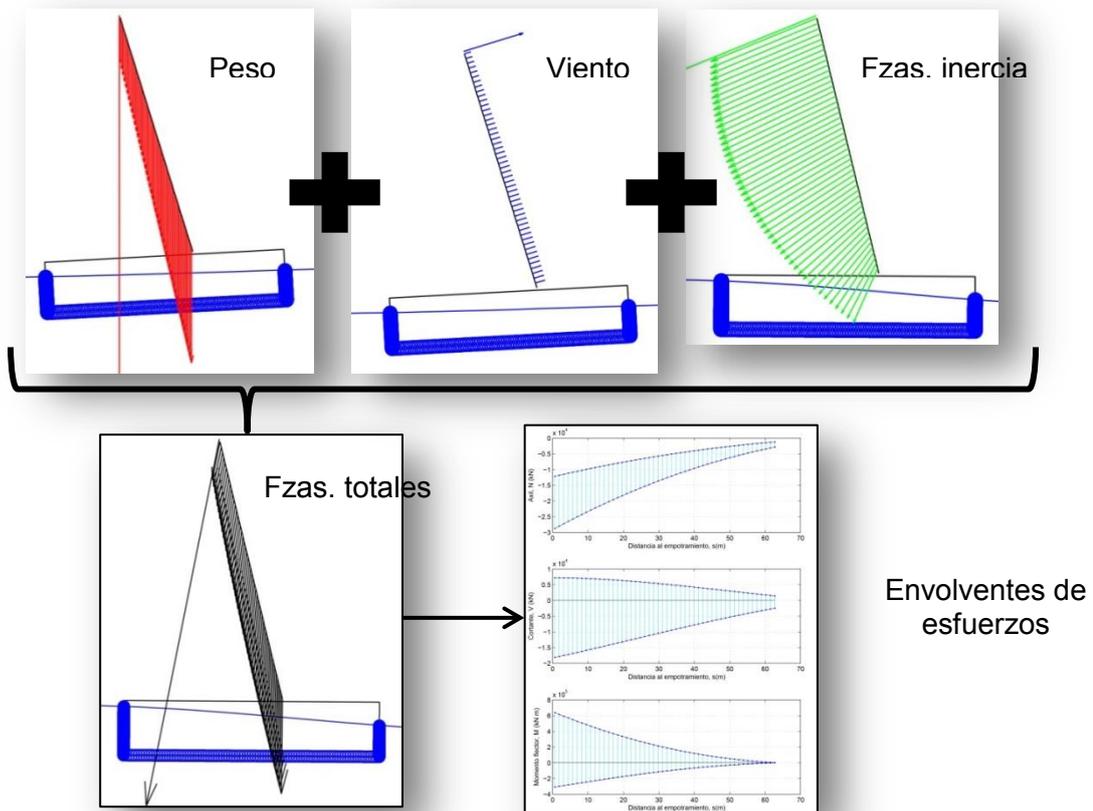


Figura 10: Acciones en el cálculo de esfuerzos en el fuste.

La comprobación se realiza a nivel de sección, verificando que para cada una de las secciones, para cada uno de los estados de mar extremales considerados, no se produce una combinación de esfuerzos que la sección no puede soportar. Este concepto encuentra su aplicación en los diagramas de interacción momento axial, los cuales son indicados para la comprobación de elementos flexo-comprimidos (Hernández-Montes & Gil-Martín 2007).

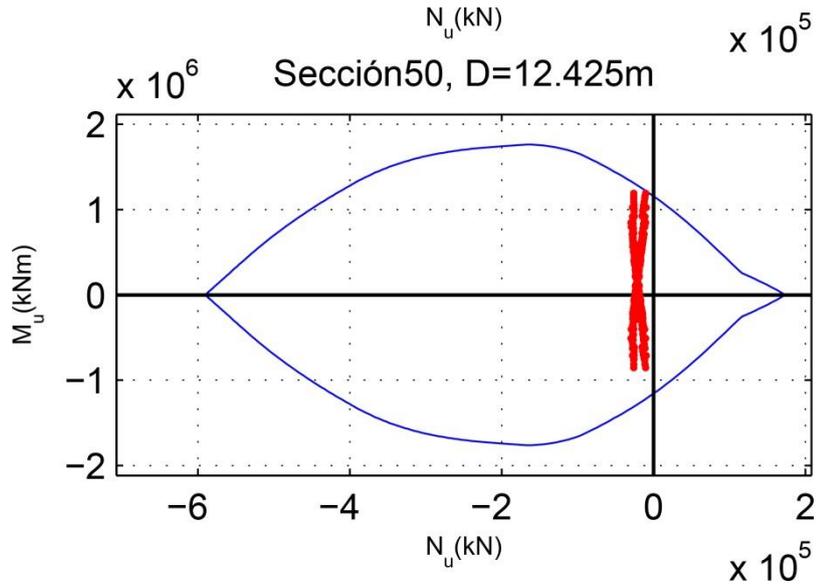


Figura 11: Comprobación de la sección del empotramiento. En azul, el diagrama de interacción. En rojo, las combinaciones de esfuerzos momento flector-axil en los estados de mar extremales.

- Fallo por agotamiento a cortante. Se lleva a cabo según la expresión ampliamente utilizada de la norma EHE. Se desprecia la contribución de las armaduras, aceptando que sólo el hormigón es el responsable de absorber el esfuerzo cortante.
- Fallo por fisuración en el fuste. Este fallo se produce cuando los esfuerzos de flexión-compresión son tales que se produce fisuración en el fuste, quedando las armaduras expuestas al ataque del medio marino. Para este fallo, no se comprobarán los estados de mar extremales, ya que en este caso se acepta que el fallo se produzca de forma ocasional. En su lugar, se comprueba para un estado de mar estadísticamente representativo del clima marino de la zona.

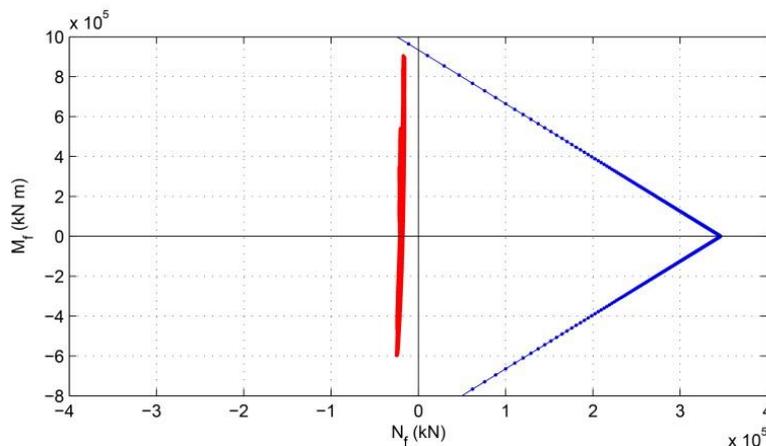


Figura 12: Comprobación de no fisuración de la sección del empotramiento. En azul, el diagrama de interacción a fisuración. En rojo, las combinaciones durante el estado de mar simulado.

- Fallo por movimiento excesivo de la turbina. Esta fallo ya lo abordamos en el primer estadio del proyecto, es decir, la fase de diseño. Al proponer un diseño con rótula se logra independizar el giro de la turbina y el fuste, evitando la pérdida de rendimiento productivo.

4. Resultados

- Para los estados de mar simulados, el giro máximo de la estructura no sobrepasa los 0.47 Rad., y por lo tanto no se produce el fallo por el choque de las palas con el fuste.
- No se produce agotamiento a flexión compresión para los estados de mar extremales registrados, consiguiéndose además una optimización de la fuerza y sección del postesado por medio del ajuste de la gráfica de interacción a los valores de los esfuerzos soportados.
- El esfuerzo cortante es soportado con un amplio margen de seguridad, aun considerando sólo la sección de hormigón. Esto se debe a que el postesado otorga un considerable aumento de la resistencia a cortante en el fuste, permitiendo prescindir de cualquier tipo de armadura transversal en la estructura.
- No existe fisuración en el fuste durante los estados de mar más frecuentes, por lo que la durabilidad de la estructura frente al ataque de los cloruros está garantizada.

5. Conclusiones

- En litorales con plataforma continental estrecha, como el caso de la mayor parte del litoral ibérico, las estructuras flotantes pueden ser una solución para la implantación de parque eólicos marinos.
- Las estructuras articuladas podrían constituir una solución para minimizar las oscilaciones de la turbina de los molinos eólicos marinos, permitiendo el óptimo rendimiento en la producción.
- La construcción en seco en lugares cercanos al emplazamiento del parque es una opción que puede reducir considerablemente costes de construcción y asegurar la calidad del proceso.
- Los modelos numéricos constituyen una herramienta útil a nivel de anteproyecto y pueden proporcionar una primera aproximación al comportamiento del molino en el mar.

Referencias

Chakrabarti, S. (2001). Empirical calculation of roll damping for ships and barges. *Ocean Engineering*, 28(7), 915-932.

España. Instrucción del Hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 18 de julio de 2008.

Hernández-Montes, E., & Gil-Martín, L. M. (2007). *Hormigón Armado y Pretensado. Concreto reforzado y preesforzado*.

Patel, M. H., & Witz, J. A. (2013). *Compliant offshore structures*. Butterworth-Heinemann. Oxford.

Solé, A.(2008). *Aerogeneradores*, A. Cano Pina.

