

Diseño del SKS y cable dinámico en la plataforma flotante HiveWind

SKS and dynamic cable design on HiveWind floating platform

Manuel Alejandro Nicolás Pazo^a, Enrique de Faragó Botella^b, Roberto Pillado González^c, Albert Calero Monteagudo^d

^a Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Director de Proyectos. manuel.nicolas@proes.es

^b Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Director de Área. enrique.farago@proes.es

^c Máster Ing. de Caminos, C. y P. PROES Consultores. Director del Departamento de Ingeniería Marítima. roberto.pillado@proes.es

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER. Director de Proyectos. albert.monclus@sener.es

RESUMEN

El artículo presenta el diseño del sistema de amarre (SKS) y del cable dinámico de exportación de energía para la plataforma flotante HiveWind, desarrollada para soportar turbinas eólicas de 15 MW en aguas profundas y condiciones marinas severas. El SKS emplea líneas en catenaria, mientras que el cable dinámico adopta una configuración Lazy Wave, garantizando flexibilidad y durabilidad frente a los movimientos de la plataforma. Se validaron las estrategias de diseño mediante simulaciones computacionales y ensayos en tanque.

ABSTRACT

The paper presents the design of the mooring system (SKS) and the dynamic power export cable for the floating platform HiveWind, developed to support wind turbines of up to 15 MW in deep waters and severe marine conditions. The SKS employs catenary lines, while the dynamic cable adopts a Lazy Wave configuration, ensuring flexibility and durability against platform offsets. Numerical simulations and tank tests validated the design strategies.

PALABRAS CLAVE: SKS, cable dinámico, aerogenerador, flotante, OWT, FOWT.

KEYWORDS: SKS, dynamic cable, wind turbine, floating, OWT, FOWT.

1. Introducción

El avance hacia una economía energética descarbonizada ha llevado al desarrollo de tecnologías emergentes en energía renovables. Con más de 30 GW de potencia acumulada, la energía eólica es la primera fuente de generación de electricidad en España. Dentro de las energías eólicas, su producción en medios marinos y

offshore presenta unas particularidades especiales. Hivewind es una plataforma semi-sumergible, diseñada para soportar turbinas de más de 15 MW en entornos marinos hostiles de hasta 500 m de profundidad. Este artículo se centra en el diseño del sistema de amarre (Station Keeping System, SKS) y del cable dinámico para

la exportación de energía, abarcando tanto los fundamentos técnicos como las estrategias de diseño utilizadas.

2. Plataformas eólicas marinas

Alrededor del 80% de las turbinas eólicas marinas (Offshore Wind Turbine, OWT) se encuentran cimentadas en el fondo del mar, utilizando monopilotes. Este tipo de cimentación fija proporciona una base sólida para la torre y la turbina. El monopilote es una construcción consistente en un tubo de acero con un diámetro de unos 5 m, pudiendo llegar, en algún caso particular, hasta los 13 m. La longitud de los monopilotes oscila entre 20 m y más de 120 m, y su peso entre 1.000 y 3.500 toneladas. Este tipo de soluciones tecnológicas se emplean cuando la profundidad de la zona de explotación no supera los 40 m.

Para profundidades mayores y hasta los 60 m, la solución óptima para la cimentación de los aerogeneradores suele ser los *jackets* (Figura 1). Este tipo de soluciones presentan estructuras en celosía, con tres o cuatro soportes cimentados directamente sobre el lecho marino. El anclaje de los soportes se realiza por medio de pilotaje metálico.



Figura 1. Jackets de Nervión Naval Offshore.

Cuando la profundidad del emplazamiento no permite la cimentación directa sobre el lecho marino de manera económica, se recurre al empleo de parques eólicos marinos flotantes (Floating Offshore Wind Turbine, FOWT) que, como su nombre indica, no requieren de cimentaciones fijas en el lecho marino y, por tanto, pueden instalarse a

mayores profundidades. Dentro de esta modalidad de cimentación, la solución más extendida es la plataforma semisumergible, que aporta estabilidad a la torre del aerogenerador por medio del equilibrio hidroestático de la parte sumergida.

3. La realidad de la costa española

La energía eólica marina se diferencia de la eólica terrestre por la presencia de un viento más laminar y con mayores velocidades medias, lo que la convierte un recurso más energético por km². Como complemento, en la eólica offshore no existen las limitaciones geométricas en el transporte de elementos que se da en la terrestre, pudiendo emplearse elementos de mayores dimensiones. Es por ello que, mientras en la eólica terrestre es posible encontrar generadores de nueva generación con capacidades de 3 MW por unidad, en la eólica marina la potencia de generación alcanza los 20 MW por aerogenerador.

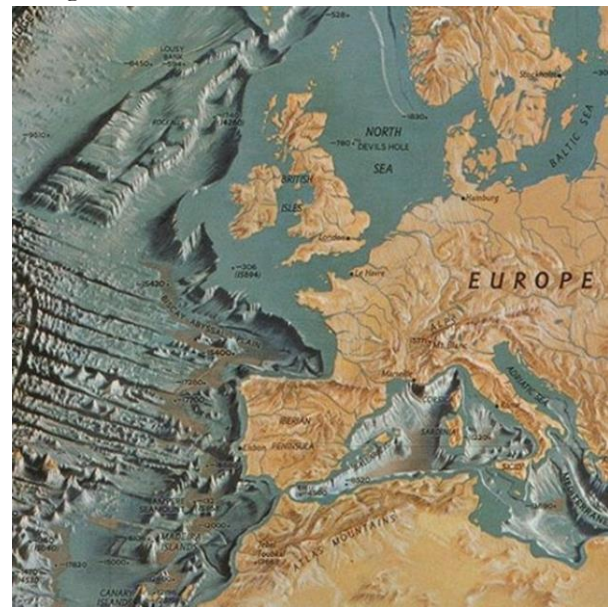


Figura 2. Batimetría del océano en Europa.

España, un país con más de 6.000 km de costa, posee una ingente fuente de energía eólica sin explotar. Mientras Reino Unido posee más de 2.000 turbinas conectadas, en España no existen más que prototipos de ensayo. El principal motivo de esta falta de instalaciones es

que, mientras la profundidad media del mar del Norte es de 70 m, en España se alcanzan grandes profundidades cerca de la costa, por poseer una plataforma continental muy reducida (Figura 2). Dentro de estas características particulares españolas, cobra especial interés el empleo de parque eólicos marinos flotantes.

4. Proyecto Hivewind

El proyecto Hivewind se formó mediante la colaboración de las empresas Sener y Nervión Naval-Offshore con el objetivo de desarrollar y comercializar plataformas flotantes para turbinas eólicas marinas de más 15 MW.

La plataforma Hivewind se compone de seis columnas hexagonales de baja altura dispuestas en forma triangular, tres en los vértices y tres en el centro de los lados del triángulo, unidas mediante arrostros rectangulares (Figura 3). Las columnas hexagonales permiten la fabricación industrializada a gran escala de estas plataformas, optimizándose los tiempos de fabricación y la mano de obra necesaria.

Sobre una de las columnas situadas en el centro del lado del triángulo, se aloja la pieza de transición que sirve para conectar la torre y el aerogenerador a la plataforma de cimentación. Es bajo esta columna donde se sitúa la salida del cable de exportación de la electricidad generada.

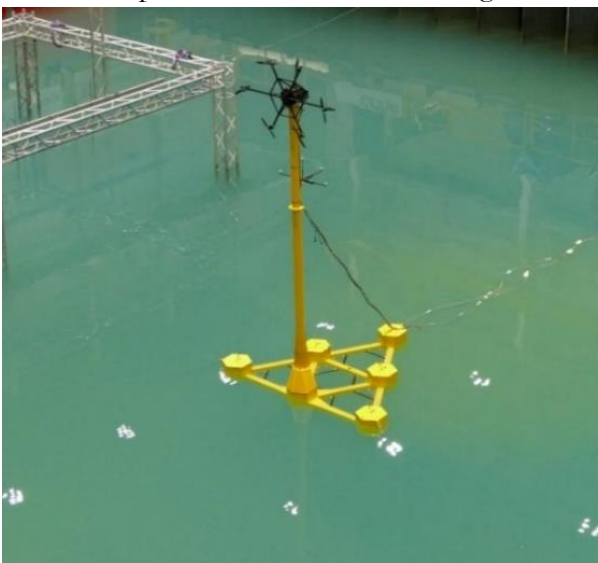


Figura 3. Modelo a escala para ensayo en tanque.

El sistema de amarre de esta plataforma flotante consiste en un sistema de tres cadenas en catenaria, unidas a los vértices de la plataforma.

El sistema de unión entre columnas se completa con un conjunto de placas de *heave*, que incrementan el amortiguamiento vertical de la plataforma, permitiendo una mayor estabilidad del conjunto frente a los oleajes.

La configuración particular de esta plataforma permite la formación de tres *moonpools*, que modifican las características dinámicas de la plataforma, mejorando su comportamiento en emplazamientos con fuerte oleaje.

5. Sistema de amarre

5.1 Configuración del amarre

El sistema de amarre (SKS) es fundamental para garantizar la estabilidad de la plataforma flotante, minimizando los desplazamientos bajo la influencia de fuerzas externas.

En el caso de la plataforma HiveWind, el diseño del amarre se realiza por medio de tres líneas en sistema semirrígido, unidas a la plataforma en los tres vértices de su planta.

Las líneas de amarre se componen de un primer tramo de cadenas, seguido de un tramo sintético en suspensión permanente con flotabilidad positiva y un tercer tramo de cadena pesada, en contacto discontinuo con el lecho marino. Para reducir las necesidades de longitud de cadena, este último tramo incorpora lastres de cadena, que incrementan el peso y la estabilidad de la forma de la catenaria del tercer tramo.

5.2 Modelos numéricos de simulación

El diseño del sistema de amarre se realizó por medio de un cálculo dinámico desarrollado en el dominio del tiempo. Debido a las características del sistema, se consideraron hipótesis de grandes desplazamientos en el cálculo.

Para mejorar la estabilidad de cada simulación y aumentar la calidad de los resultados, cada simulación se componía de tres fases. En una primera fase, se llevaba la estructura hasta la configuración de equilibrio estático con todas las cargas permanentes, así como con las cargas medias dinámicas que actuarían sobre la plataforma. Desde esta posición inicial se procedía a aplicar, de forma progresiva, las cargas dinámicas dependientes del tiempo, en una segunda fase de precálculo. Finalmente, con el modelo dinámicamente en equilibrio, se procedía a desarrollar la simulación completa.

La fase de precálculo se desarrollaba a lo largo de un periodo de al menos 10 minutos, mientras que cada simulación numérica alcanzaba las tres horas. El programa empleado para la realización de las simulaciones es el OrcaFlex.

5.3 Calibrado del modelo numérico

El modelo numérico desarrollado para el estudio del sistema de amarre y del cable dinámico fue sometido a un proceso de calibrado, para reducir las incertidumbres sobre los parámetros considerados y mitigar los riesgos del diseño. Para ello, se fueron comparando los resultados del modelo numérico con los obtenidos por medio de un modelo a escala reducida, simulado en tanque. Los ensayos en tanque se realizaron en las instalaciones del IHCantabria en Santander (Figura 3).

5.4 Condiciones medioambientales

Las condiciones de oleaje, viento y corriente se basan en la ubicación del primer prototipo, aunque también se incluyen opciones para un emplazamiento genérico en la costa mediterránea española y en la costa atlántica.

Para modelizar las olas irregulares, se aplica el espectro de Jonswap, similar al de Pierson-Moskowits. Cada estado de mar es

generado por al menos 10 semillas de generación de oleajes aleatorios.

En las fases iniciales del diseño, para la simulación del viento se consideraba el espectro NPD, mientras que el diseño final se realizó por medio de vientos turbulentos específicos, generados mediante la aplicación TurbSim.

La velocidad de la corriente se considera constante en el tiempo, con una tasa de decrecimiento potencial según la profundidad conforme a la normativa DNV.

6. Cable de exportación de energía

El cable de exportación es el responsable de la transmisión de la energía generada en el mar hacia la red eléctrica terrestres. En su interior, se sitúan tres núcleos de material conductor, compuestos por cobre o aluminio de gran sección. Cada unidad conductora está recubierta por un doble sistema de camisa armada, que confiere al conjunto resistencia y rigidez. Cada núcleo se aísla térmica y electromagnéticamente. La sección transversal del cable dinámico se completa por medio de otros conductos de fibra óptica, que sirven para la comunicación entre la plataforma y la central de gestión, que realiza la evaluación de la plataforma en tiempo real. El conjunto se encuentra sellado, para evitar la filtración de agua marina en el interior.

A diferencia de lo que ocurre en el caso de aerogeneradores cimentados sobre sistemas fijados al fondo marino, los cables de exportación de energía de aerogeneradores sobre cimentaciones flotantes poseen dos tramos diferenciados. La mayor parte del cable reposa estáticamente en el lecho marino, pero una pequeña fracción de este elemento debe absorber los desplazamientos de la plataforma flotante, que alcanzan algunas decenas de metros. Este tramo de cable dinámico debe acompañar a la estructura en sus movimientos de deriva, lo que origina fuerzas dinámicas de relevante importancia. Además, someten a la parte inferior del cable a un desgaste extra,

debido al rozamiento con el fondo marino. Un punto que requiere un especial cuidado a la hora de realizar el diseño de esta parte es la unión del cable dinámico con la plataforma, por suponer un punto rígido en el que la flexión en el cable alcanza sus máximos valores absolutos.

6.1 Configuración del cable dinámico

La configuración seleccionada para el cable dinámico de la plataforma HiveWind es la de Lazy Wave. La elección de este sistema se basa en los criterios de rentabilidad y de facilidad de ejecución. La configuración por medio de Lazy Wave se compone principalmente de tres tramos diferenciados.

El primer tramo de cable cuelga libremente de la plataforma flotante formando una catenaria. El diseño de este primer tramo se encuentra condicionado por la presencia de la conexión entre el cable dinámico y la plataforma. Esta conexión supone un punto de empotramiento, en el que se producen grandes valores de momentos flectores en el cable. El dimensionamiento de esta zona suele venir limitado por la fatiga del cable. Otro condicionante del diseño de este tramo es la necesidad de evitar el contacto entre el fondo marino y el cable, para evitar el daño del mismo.

En el segundo tramo, se dota al cable de una flotabilidad extra, que permite la formación de una catenaria invertida. En el caso particular de esta plataforma, la flotabilidad se consigue por medio de un sistema de boyas acopladas en línea con el cable de exportación. La longitud y curvatura de este tramo es la que proporciona la flexibilidad al cable y le transfiere la capacidad de acompañar el movimiento de la plataforma sin dañarse. El diseño de este segundo tramo debe realizarse de manera que se evite el impacto entre el cable y la plataforma o los sistemas de amarre. Además, el cable dinámico debe estar lo suficientemente profundo como para permitir la navegación de los equipos de mantenimiento en las proximidades de la plataforma.

El tercer tramo de cable cuelga nuevamente libre hasta el punto de contacto, a una cierta distancia del punto de conexión con el cable estático. La posición de este punto de contacto es variable y depende de las condiciones meteoceánicas a las que se encuentra sometida la plataforma (Figura 4).

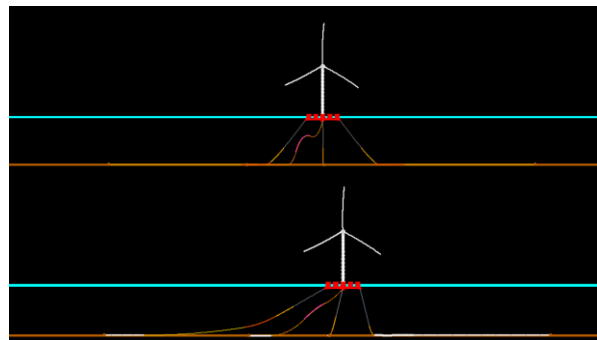


Figura 4. Simulación en el tiempo del cable dinámico en equilibrio estático (superior) y en máxima excursión (inferior).

Debido a la fuerte abrasión a la que es sometido el último tramo del cable dinámico, se le dota de un encamisado protector para incrementar la durabilidad del elemento.

6.2 Estados de diseño del cable dinámico

A lo largo de la vida del aerogenerador, la geometría del cable cambia progresivamente. Esto es debido a varios fenómenos, como la formación de adherencias marinas o la filtración de agua en los módulos de flotación de la curva Lazy Wave. Por estos motivos, el cable se hace más pesado y su diámetro y rugosidad se incrementa a lo largo de la vida útil. Esta evolución de las características del elemento debe ser tenidas en cuenta. Cada estado de mar simulado debe realizarse para las características iniciales del cable (Start-Of-Life, SOL) y para las condiciones finales (End-Of-Life, EOL) (Figura 5).

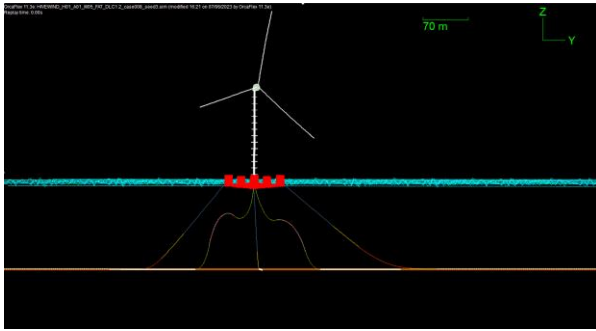


Figura 5. Modelo con configuración SOL (izquierda) y EOL (derecha) del cable dinámico.

6.3 Simulación de los estados de mar

Los modelos numéricos utilizados para la simulación de los cables dinámicos se corresponden con los definidos en el apartado sobre el sistema de amarre, por lo que no serán descritos nuevamente.

Agradecimientos

La energía eólica marina es una realidad, gracias a la implicación de los grandes equipos multidisciplinares que se encuentran actualmente desarrollando esta tecnología. Ingenieros industriales, navales, aeronáuticos y de caminos trabajan de manera conjunta para poder seguir optimizando los recursos necesarios para la materialización de estos elementos. Quisiera agradecer la colaboración prestada, tanto por el equipo de Sener como por el de Nervión Naval Offshore, para el desarrollo de este prototipo, que pronto verá la luz.