



Nuevos avances en materiales para su uso en plataformas eólicas flotantes

DR. AMADEU CONCUSTELL FARGAS

Investigador de la Unidad de Materiales Metálicos y Cerámicos del centro tecnológico Eurecat

DRA. SÍLVIA MOLAS BUSQUETS

Responsable de la Línea de Investigación en Corrosión y Degradación del centro tecnológico Eurecat

Los proyectos HELIX y DURALINK, liderados por Eurecat, impulsan nuevos avances en materiales para asegurar la durabilidad y eficiencia de las estructuras de soporte de los molinos de viento en alta mar.





La energía eólica ha sido uno de los grandes pilares del avance de las energías renovables en las últimas décadas. Desde su aparición, las turbinas eólicas terrestres han evolucionado significativamente, convirtiéndose en una fuente de energía clave en muchos países. No obstante, las limitaciones geográficas y la necesidad de aprovechar el vasto potencial de los recursos marinos han llevado a la industria a mirar hacia el mar. Las plataformas eólicas marinas y, más recientemente, las plataformas eólicas flotantes representan una de las innovaciones más prometedoras para captar energía en áreas de aguas profundas, donde los vientos son más fuertes y constantes. Sin embargo, las condiciones a las que se ven expuestas estas plataformas son muy agresivas debido a las elevadas tensiones mecánicas que deben soportar y a la agresividad del ambiente marino. Los proyectos HELIX y DURALINK, liderados por Eurecat, impulsan nuevos avances en materiales para asegurar la longevidad y eficiencia de las estructuras de soporte de los molinos de viento en alta mar.

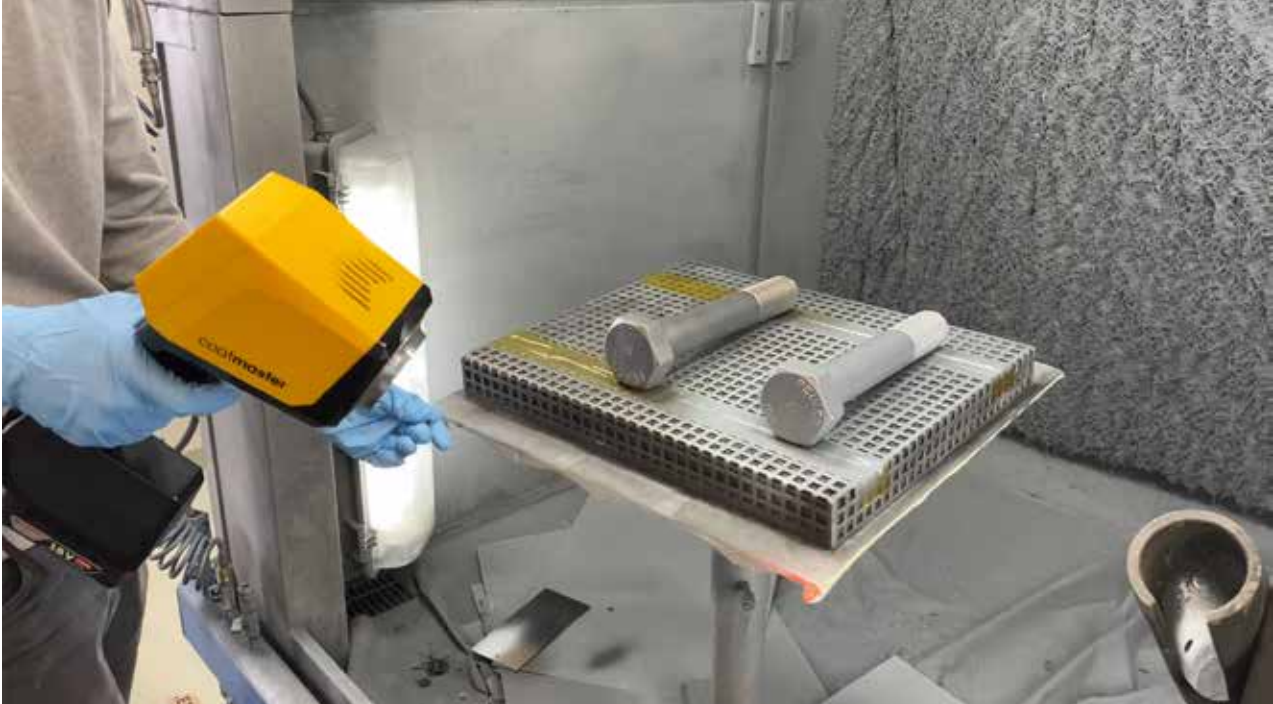
EL POTENCIAL DE LA ENERGÍA EÓLICA MARINA FLOTANTE

La energía eólica marina con turbinas en torres fijas ancladas al fondo del mar enfrenta limitaciones debido a la profundidad del agua. Las turbinas fijas solo se pueden construir en aguas poco profundas, es decir, en ciertas zonas costeras. Sin embargo, en mares u océanos más profundos, como el Atlántico o el Mediterráneo, estas soluciones no son viables.

En contraste, las plataformas eólicas flotantes pueden ser instaladas en aguas más profundas, expandiendo enormemente las áreas donde se puede aprovechar la energía del viento. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), los sitios más favorables para la energía eólica marina podrían generar más electricidad de la que se consume actualmente en todo el mundo. Esta fuente de energía no solo es abundante, sino que también tiene la capacidad de superar a otras fuentes de energía, como el carbón y el gas natural, en términos de fiabilidad y capacidad de generación.

En este sentido, las turbinas fijas, como las utilizadas en las primeras plantas eólicas marinas, solo pueden instalarse en áreas con una profundidad máxima de 60 metros. Esto excluye grandes áreas con un potencial eólico significativo, como la mayor parte del Mar del Norte y del Océano Atlántico. Sin embargo, las plataformas flotantes pueden anclarse en aguas mucho más profundas, hasta 200 metros o más, lo que abre nuevas oportunidades para el desarrollo de la energía eólica en áreas previamente inaccesibles.

Además, al estar más alejadas de la costa, estas plataformas tienen un impacto visual mucho menor, lo que las hace más aceptables socialmente. También permiten acceder a áreas con vientos más fuertes y constantes, lo que mejora la eficiencia de las turbinas y reduce los costes de generación de electricidad a largo plazo.



Sistema de medición del espesor del recubrimiento del tornillo

TURBINAS EÓLICAS MARINAS: MATERIALES PARA APOYAR LOS NUEVOS DESARROLLOS

La eficiencia económica es una de las consideraciones más importantes en el diseño de una estructura de soporte para turbinas eólicas de gran tamaño (XL-WT, por sus siglas en inglés). La estructura de soporte está típicamente hecha de acero y su contribución al precio puede ser de hasta un 13,3%. Dado que la altura de una torre determina directamente su rendimiento, se espera un aumento de la altura en las nuevas turbinas, lo que deriva en que la estructura de acero de una XL-WT sea una de las partes más críticas. Como el coste del material tiene una contribución significativa al coste total de la turbina eólica, un diseño eficiente en el uso de materiales resultará en una disminución del coste de la energía generada. En este sentido, los proyectos HELIX y DURALINK contribuyen en la mejora y optimización de los materiales utilizados en la subestructura y torre, en las cadenas y en los recubrimientos para la protección a la corrosión de las estructuras marinas para turbinas eólicas.

ESTRUCTURAS MÁS LIGERAS Y RESISTENTES

El diseño de estructuras marinas se realiza principalmente de acuerdo con los códigos DNV, siendo el estándar principal el DNV-ST-0126. Los aceros de grado S355 N/M/NL/ML4 son las calidades de acero estructural de referencia más comunes en toda la UE para muchos proyectos de construcción. El uso de estos aceros hace que las turbinas más grandes necesiten espesores más gruesos. De hecho, ya se están construyendo monopilotes con un diámetro superior a los 7 metros y espesores en el rango de 70 a 110 mm en los Países Bajos.

El aumento del grosor de la sección de acero elimina la tendencia al colapso de la estructura, pero tiene penalizaciones severas en términos de la integridad estructural de las torres. El campo de tensión triaxial que existe en las gruesas placas de acero de las torres tiende a disminuir la extensión de la deformación plástica, lo que podría conducir a una fractura frágil. Además, las propiedades de fatiga no son las mismas a lo largo de todo el espesor del material en el caso de secciones gruesas.

Con estos grandes espesores, el interior de la sección puede haber experimentado crecimiento de grano y segregaciones. Estos defectos, más posibles inclusiones, pueden acelerar la propagación de grietas en el material interno, reduciendo la vida a fatiga.

Finalmente, la soldadura de las placas de acero en las estructuras de soporte es un requisito indispensable. Las tensiones residuales, debido a los grandes espesores de las placas, y los cambios microestructurales inherentes en la soldadura respecto al material base hacen que las soldaduras sean más susceptibles al fallo.

El proyecto DURALINK propone investigar soluciones para turbinas eólicas de gran tamaño basadas en aceros de mayor resistencia, como los grados S420NL y S460NL. El uso de estos aceros reducirá el grosor de las placas de las futuras estructuras de soporte para grandes turbinas eólicas, haciéndolas duraderas y económicamente viables. En DURALINK, se demuestran las ventajas de estos grados con respecto al material utilizado actualmente. Una de las ventajas de estos aceros es la reducción del peso de la estructura, pero, por el contrario, son más susceptibles a la fragilización inducida por hidrógeno. Por eso, es importante aumentar el conocimiento sobre la resistencia a fatiga de estos aceros y cómo mejorarla.



El proyecto DURALINK también optimiza el procedimiento de soldadura para garantizar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de las uniones. La verificación de la resistencia a fatiga de las estructuras soldadas se realiza de acuerdo con la norma EN 1993-1-9:2005 (borrador de la versión EN 1993-1-9:2023) para torres eólicas y DNV-RP-C203 para cimentaciones en alta mar, pero no existe información sobre el aumento de la resistencia a fatiga debido a los tratamientos postsoldadura. En el proyecto se llevan a cabo nuevas investigaciones sobre las ventajas de utilizar tratamientos posteriores a la soldadura en ambos grados de acero en comparación con el grado estructural S355 utilizado actualmente. El impacto mecánico de alta frecuencia es una tecnología de tratamiento postsoldadura. Este tratamiento mejora la resistencia a fatiga de la soldadura mediante la introducción de tensiones residuales de compresión y a la mejora de la geometría local de la soldadura.

CADENAS DE ACERO MÁS LIGERAS PARA AMARRAR LAS ESTRUCTURAS MARINAS

El aumento en el uso de aceros de alta resistencia en elementos estructurales clave ha sido un tema de interés para aplicaciones marinas y submarinas desde hace muchos años y, específicamente, en cadenas para sujetar las plataformas

de turbinas eólicas flotantes. Aprovechar su mayor resistencia específica permite reducir el tamaño de las estructuras, ahorrando peso, costes y reduciendo el número de elementos necesarios para una función estructural determinada.

Sin embargo, los aceros de alta resistencia deben manejarse con cuidado en el servicio marino, ya que son susceptibles al agrietamiento por fragilización inducida por hidrógeno. En este contexto, la protección catódica, que es una medida contra la acción corrosiva del agua de mar, es un factor importante para tener en cuenta, ya que aumenta los fenómenos de fragilización por hidrógeno en estos aceros. Las fallas inducidas por hidrógeno se caracterizan por una fractura frágil y repentina y, en consecuencia, la combinación de aceros de alta resistencia y protección catódica debe evaluarse para evitar incidentes de seguridad estructural en las turbinas eólicas marinas flotantes que podrían generar pérdidas económicas significativas.

En el caso de las líneas de amarre, los estándares que regulan el diseño y la calificación incluyen controles relacionados con la fragilización inducida por hidrógeno (DNV-OS-E302:2022). Además, para las condiciones de servicio, incluida la protección catódica, los aceros martensíticos con un límite de fluencia superior a 700 MPa y una dureza superior a 350 HV, como los grados R5 y R6, son conocidos por ser susceptibles a fallos por fragilización inducida por hidrógeno (DNV-OS-B401:2021).



Medición de las propiedades de fatiga en ambiente corrosivo

En el proyecto DURALINK, se expande el uso de aceros de alta resistencia, grados R5 y R6. Estos desarrollos permitirán soportar mayores cargas producidas por el aumento de tamaño de la torre y la estructura de soporte. Parte del trabajo se centra en reducir la susceptibilidad a la fragilización inducida por hidrógeno de los nuevos aceros gracias a su composición química, los procesos siderúrgicos durante el proceso de fabricación y a los tratamientos térmicos que se realizan posteriormente para llegar a las propiedades mecánicas especificadas en la norma.

PERNOS Y TORNILLOS DE MAYOR TAMAÑO

Por otro lado, el aumento de tamaño de las turbinas eólicas también requiere pernos y tornillos de mayor tamaño, con métricas superiores a M64, y aceros con mayor resistencia mecánica. El proyecto HELIX desarrolla nuevos aceros de alta resistencia (grados 10.9 y 12.9) con alta tenacidad y resistencia a la fragilización por hidrógeno. La base para mejorar los aceros de alta resistencia con alta tenacidad y resistencia a la fragilización inducida por hidrógeno a un menor coste económico se basa en la optimización de la composición química y del proceso de fabricación del acero. Los aceros optimizados son grados Cr-Ni-B con una aleación equilibrada para aumentar la templabilidad y minimizar el coste de aleación. La composición de los nuevos aceros reducirá los costosos elementos de aleación tradicionales, como el Mo y el Ni, pero reforzando la templabilidad requerida mediante microaleaciones con Ti y B. Por otro lado, el control siderúrgico de los contenidos de S y P ayuda a maximizar la tenacidad a baja temperatura.

RECUBRIMIENTOS PARA UNA MAYOR DURABILIDAD

En alta mar, la protección contra la corrosión de las plataformas es necesaria debido al ambiente extremadamente corrosivo. Los ánodos de sacrificio, a veces combinados con recubrimientos orgánicos, son la estrategia principal utilizada para prevenir la corrosión en equipos sumergidos en

agua de mar. Tanto la protección contra la corrosión como las tareas de inspección implican altos costes económicos.

Para reducir estos costes, DURALINK desarrolla nuevos conceptos de protección con un mejor rendimiento operativo que los ánodos de sacrificio. El proyecto impulsa nuevos recubrimientos para proteger la subestructura y las cadenas de las turbinas eólicas de gran tamaño contra la corrosión y así extender su durabilidad, al tiempo que se reducen los esfuerzos de mantenimiento y se mejora el control de su estado estructural. Se utilizan recubrimientos aplicados por proyección térmica para reducir el número de ánodos de sacrificio, así como la demanda de corriente para estos ánodos. Las nuevas aleaciones están basadas en Zn y Al y se producen en forma de alambre para luego ser proyectadas térmicamente y obtener recubrimientos para su aplicación en zonas sumergidas y de marea.

En este sentido, DURALINK también innova en las tecnologías utilizadas para producir los recubrimientos. La proyección de arco eléctrico con alambre es la tecnología más frecuentemente utilizada debido a su simplicidad, fiabilidad y productividad. DURALINK produce los nuevos recubrimientos mediante una evolución de esta técnica, proyección de alta velocidad de arco eléctrico con alambre. De este modo, la calidad de los recubrimientos se verá mejorada, ya que al aumentar la velocidad con la que las partículas de la aleación impactan en la superficie para formar el recubrimiento resultará en una reducción de la porosidad y se obtendrán nuevas fases cristalinas. La menor porosidad conduce a un menor consumo catódico del recubrimiento, lo que es más económico y sostenible para el ambiente marino.

Por otro lado, las nuevas fases cristalinas en el recubrimiento resultarán en un impacto positivo en su resistencia a la corrosión. Así pues, los recubrimientos desarrollados en DURALINK ofrecerán una mayor productividad, protección contra la corrosión activa y pasiva para el área sumergida, y se espera una reducción de la fragilización inducida por hidrógeno en aceros de alta resistencia debido a un potencial de protección catódica más bajo gracias a las composiciones desarrolladas.

Po su parte, en el proyecto HELIX, se han desarrollado nuevos recubrimientos orgánicos con zinc en escamas para la protección de pernos y tornillos en ambiente marino. Los revestimientos desarrollados consisten en una capa base y una capa de acabado. El comportamiento frente a la corrosión de la capa base depende de la morfología y composición de las escamas de zinc y de la naturaleza del aglutinante. En HELIX, se ha optimizado la composición de las escamas y el aglutinante con el fin de obtener un revestimiento capaz de actuar como capa pasiva creando una barrera o como capa activa sacrificando el material que forma las escamas para proteger al acero. La reducción o el aumento de esta protección catódica contra la corrosión de las escamas de zinc repercute en el comportamiento frente a la corrosión, pero también en el fenómeno de fragilización inducida por hidrógeno. También se ha optimizado la capa de acabado, que pueden ser inorgánicas y porosas u orgánicas y más densas, ya



que también desempeña un papel importante. Encontrar la combinación adecuada de capa base y acabado para la atmósfera corrosiva circundante era uno de los objetivos clave del proyecto HELIX.

IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCCIÓN DE COSTES

El desarrollo de estas plataformas contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, al reemplazar las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles con energía limpia y renovable. Según la IEA, la energía eólica marina tiene el potencial de convertirse en la mayor fuente de suministro eléctrico a nivel global, superando incluso a las plantas de energía a gas y carbón.


Desde una perspectiva económica, la adopción de plataformas eólicas flotantes a gran escala también tiene el potencial de reducir los costes de la energía renovable. Los avances en el diseño de las plataformas y el uso de materiales más eficientes como los desarrollados en los proyectos HELIX y DURALINK ayudarán a reducir los costes asociados a la instalación y al mantenimiento de las plataformas flotantes. Se espera que, a medida que las tecnologías flotantes maduren, el coste de la energía generada en las nuevas plataformas flotantes sea plenamente competitiva en términos económicos.

Además de las innovaciones técnicas, las plataformas eólicas flotantes también ofrecen beneficios ambientales

significativos. Al instalar las turbinas más lejos de la costa, se reduce el impacto visual y acústico en las comunidades costeras, y se aprovechan los vientos más fuertes y constantes que se encuentran mar adentro.

EL FUTURO DE LA EÓLICA FLOTANTE

La evolución de las plataformas eólicas flotantes representa un avance significativo en la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de fuentes de energía limpias y sostenibles. Con el apoyo de la innovación tecnológica y la colaboración internacional, estas plataformas tienen el potencial de transformar el panorama energético mundial, proporcionando una fuente de energía limpia, abundante y económicamente viable para las generaciones futuras.

Los proyectos pioneros en Europa, como HELIX y DURALINK, están liderando el camino hacia la adopción de tecnologías más avanzadas que no solo mejoran la eficiencia de las plataformas eólicas flotantes, sino que también reducen los costes asociados a su instalación y mantenimiento. A medida que continúe la investigación en este campo, la energía eólica flotante se consolidará como una de las soluciones clave para satisfacer la creciente demanda de energía limpia en todo el mundo. 

EURECAT

www.eurecat.org