

TÉCNICAS AVANZADAS DE O&M EN PARQUES EÓLICOS MEDIANTE EL USO DE DRONES

Ramos Hernández, B.
Fiffe Verdecia, R.P.
Hellín Villarig, D.
Domínguez Bravo, F.J.



Publicación disponible en el [Catálogo general de publicaciones oficiales](#)

© CIEMAT, 2024

ISSN: 2695-8864

NIPO: 152-24-014-7



Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

No está permitida la publicación de este documento en cualquier dominio que no pertenezca al CIEMAT.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	5
2	PARQUES MARINOS OFFSHORE	7
2.1	DESAFIOS DE LA INDUSTRIA EÓLICA MARINA A NIVEL MUNDIAL ...	8
2.2	EL MERCADO EÓLICO MARINO	11
2.3	CONTEXTO DE LA ENERGÍA EÓLICA MARINA EN EUROPA	14
2.4	CONTEXTO DE LA ENERGÍA EÓLICA MARINA EN ESPAÑA	19
2.5	TECNOLOGIAS PARA PARQUES EÓLICOS MARINOS	23
3	DRONES (UAV)	40
3.1	DRONES PARA LA INSPECCIÓN DE PARQUES OFFSHORE	40
3.2	ASPECTOS LEGALES EN LOS VUELOS DE DRONES.....	53
4	NUEVAS TECNOLOGÍAS INCORPORADAS A DRONES.....	60
4.1	LOS DRONES AUTÓNOMOS Y AUTORRECARGABLES	60
4.2	LOS PLANES DE VUELO CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL	61
4.3	UN MARCO INNOVADOR PARA OPERACIONES CON DRONES	62
4.4	TAREAS DE MANTENIMIENTO COMPLEJAS.....	63
4.5	INSPECCIONES DE LAS PALAS DE AEROGENERADORES MEDIANTE DRONES	65
4.6	MULTIRROTOR HÍBRIDO	66
4.7	ESTUDIAR LA CORROSIÓN MEDIANTE DRONES EN OFFSHORE ..	67
4.8	COMUNICACIÓN PARA LA LOGÍSTICA CON DRONES.....	68
4.9	ESTUDIO DE LAS TURBULENCIAS MEDIANTE DRONES.....	68
4.10	ESTUDIO DE FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS.....	69
4.11	VEHICULOS DE SUPERFICIE AUTONOMOS Y NO TRIPULADOS	71
4.12	REALIDAD AUMENTADA Y REALIDAD VIRTUAL EN DRONES	73
5	CONCLUSIONES.....	75
6	BIBLIOGRAFIA	76
	ANEXO: LISTA DE ACRÓNIMOS	84

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Imagen de un dron en un parque offshore creada con AI.
- Figura 2. Capacidad mundial de fabricación de aerogeneradores eólicos marinos, 2021 [2].
- Figura 3. Desglose del LCOE a nivel de componentes para el funcionamiento típico de un parque eólico marino de fondo fijo durante 25 años, 2020 [2].
- Figura 4. Ratio de nuevas instalaciones de energía marina offshore [3].
- Figura 5. Ratio de nuevas instalaciones de energía marina offshore por mercado [3].
- Figura 6. Contexto internacional de la UE de las energías Renovables Marinas [15].
- Figura 7. Cuencas marinas UE. Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica marina y de las energías del mar en España. [15].
- Figura 8. Potencia eólica terrestre y marina instalada en Europa en 2023 [14].
- Figura 9. Prototipo W2POWER en el banco de ensayos de PLOCAN [24].
- Figura 10. Evolución del tamaño medio de los aerogeneradores. [15].
- Figura 11. Principios físicos del cubo de succión.
- Figura 12. Tecnologías de Cimentación Fija [28].
- Figura 13. Número acumulado de cimentaciones en Europa a finales de 2020 [14].
- Figura 14. Tecnologías de eólica flotante.
- Figura 15. Parque eólico marino sin subestación offshore (izquierda) y parque eólico marino con subestación offshore (derecha).
- Figura 16. Subestación offshore compacta en torre de aerogenerador.
- Figura 17. Principales componentes estructurales y daños potenciales [33].
- Figura 18. Tendencias de publicaciones que usan ROV - UAV para actividades de O&M en alta mar [36].
- Figura 19. Plataformas robóticas para la inspección de parques offshore [35].
- Figura 20. Investigación relacionada con la robótica para O&M. Áreas rectangulares (en gris): ampliamente investigadas. Áreas elípticas (anaranjado): posibles lagunas en la investigación [36].

Figura 21.	Cajón guarda drones [39].
Figura 22.	Drones Cautivos [41].
Figura 23.	Dron equipado con un cerebro artificial [42].
Figura 24.	El Naviator [43].
Figura 25.	Drones submarinos ROV.
Figura 26.	Dron hibrido con motor de combustión [45].
Figura 27.	Dron híbrido con celdas de hidrógeno [46].
Figura 28.	Drones trepadores.
Figura 29.	Dron autónomo residente [47].
Figura 30.	Niveles de formación para Pilotos de Drones (48).
Figura 31.	Categorías de UAS
Figura 32.	Aeroarms [61]
Figura 33.	Dron para instalación de balizas avifauna en líneas de distribución eléctrica en servicio [62].
Figura 34.	Dron del proyecto HIBRiX [64].
Figura 35.	SuperARTIS [65].
Figura 36.	Establis-UAS [66].
Figura 37.	Drones para detección de huracanes [67].
Figura 38.	C-Worker 7 [69]
Figura 39.	Blue Essence [70]
Figura 40.	Hugin USV [71]

1 INTRODUCCIÓN

La energía eólica marina o energía *offshore* ha experimentado un aumento constante como fuente de generación de energía renovable. Sin embargo, los altos costes asociados a la operación y mantenimiento (O&M) han impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras. En este contexto, los drones o vehículos aéreos no tripulados UAV (del inglés *unmanned aerial vehicle*) emergen como una herramienta tecnológica clave para mejorar la eficiencia y reducir los gastos operativos (OPEX).

Estos equipos han demostrado ser instrumentos valiosos en la inspección de parques eólicos en tierra (*onshore*), especialmente en la inspección de palas y otros componentes. Hoy en día, ya existen patentes que demuestran que se puede realizar la inspección de palas, incluso con el aerogenerador en movimiento [1], algo que hasta hace poco, era impensable. En cuanto a la eólica marina, su potencial es inmenso. Los proyectos *offshore* presentan muchas más dificultades que los proyectos en tierra, lo que también genera nuevos desafíos que se convierten en oportunidades. alguna de estas oportunidades, que se abordarán a lo largo de este documento, incluyen por ejemplo las operaciones logísticas para la entrega de suministros en plataformas marinas, los estudios sobre la corrosión causada por la salinidad del agua del mar y un amplio abanico de posibilidades que ofrece el uso de la inteligencia artificial (AI, del inglés *Artificial Intelligence*) en este campo.

Sin embargo, el despliegue de drones en el mar enfrenta grandes desafíos tanto técnicos como operativos, diferentes a los de los parques en tierra. Entre estos desafíos se encuentran la coordinación de aterrizajes y despegues en plataformas flotantes, vuelos cercanos a estructuras en movimiento que requieren algoritmos de control de vuelo muy sofisticados para garantizar la seguridad, la planificación de rutas fuera del alcance visual (BVLOS, del inglés *Beyond Visual Line of Sight*) y la necesidad de cumplir con una regulación aeronáutica rigurosa. Estos aspectos son críticos y deben ser considerados detenidamente.

A lo largo de este documento, primeramente, se va a poner en contexto la situación de la energía eólica marina tanto a nivel global, como nacional, así como el análisis de las diferentes infraestructuras que se necesitan para desarrollar este tipo de proyectos y las necesidades en operación y mantenimiento que acarrearán. Seguidamente, se va profundizar en el análisis del uso de los drones en diferentes proyectos relacionados con la tecnología *offshore*. Para concluir, se destacarán algunas de las innovaciones tecnológicas más importantes y las soluciones implementadas para superar los desafíos mencionados, gracias a esta tecnología y a otras que pueden ir de la mano.

A medida que la tecnología de drones evoluciona, se abre una vía prometedora para transformar la gestión y operación de parques eólicos marinos. Se espera que esta innovación no solo reduzca significativamente los costes operativos, sino que también mejore la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de estos parques. Los drones, equipados con avanzados sistemas de monitoreo y análisis, pueden realizar inspecciones más rápidas y precisas, detectar fallos potenciales antes de que se conviertan en problemas graves, y optimizar el mantenimiento predictivo. Además, su capacidad para acceder a áreas de difícil alcance y operar en condiciones adversas aporta un valor añadido considerable. Con este documento, se pretende explorar y mostrar en detalle todo el potencial que estas tecnologías emergentes ofrecen al sector de la energía eólica, destacando cómo pueden contribuir a un futuro más sostenible y económicamente viable para la industria.



Figura 1. Imagen de un dron en un parque offshore creada con AI.

2 PARQUES MARINOS OFFSHORE

Los parques eólicos marinos *offshore* representan una de las fronteras más avanzadas y desafiantes en la generación de energía renovable. Estas instalaciones, ubicadas en zonas marinas lejos de la costa, aprovechan los vientos más constantes y fuertes que se encuentran en alta mar, lo que permite generar mayores cantidades de energía en comparación con los parques eólicos terrestres. Sin embargo, el entorno marino presenta una serie de desafíos específicos que deben ser abordados para garantizar el éxito de estos proyectos.

Según el Informe mundial sobre energía eólica marina 2022 [2] presentado por el Consejo Mundial de Energía Eólica (en inglés *Global Wind Energy Council -GWEC-*), el 2021 fue un año récord para la industria eólica marina, con 21,1 GW de nuevas instalaciones y las instalaciones acumuladas alcanzaron los 56 GW, lo que representa el 7 % del total de las instalaciones de energía eólica mundial. Y solamente un año después, el mismo informe GWEC 2023 [3], asegura que el 2022 ha sido el segundo mejor año de la historia para la eólica marina mundial, con un total de 64,3 GW de capacidad eólica marina mundial en tres continentes y 19 países, sumando 8,8 GW de nuevas instalaciones respecto al año anterior, lo que equivale al 7,1 % de la instalación mundial de energía eólica, un 0,1 % más respecto al año anterior.

La energía eólica marina está atrayendo la atención mundial a medida que los países reconocen su potencial para transformar los sistemas energéticos, desplazando a los combustibles fósiles y generando empleo y crecimiento económico. Desde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) [4], los gobiernos han establecido ambiciosos objetivos de energía eólica marina, acercando al mundo a los niveles descritos en el Pacto Energético de las Naciones Unidas entre GWEC y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), con metas de 380 GW de instalaciones eólicas marinas para 2030 y 2000 GW para 2050.

La energía eólica marina desempeña un papel crucial en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS) [5] y en la mitigación del cambio climático. Este tipo de energía representa la principal solución de mitigación climática basada en los océanos y su continuo avance debería ser una prioridad estratégica para los países que se esfuerzan por cumplir el Pacto Climático de Glasgow [4] y crear un futuro sostenible.

Este último informe GWEC 2023, pronostica para el 2032 se llegue a la cantidad de 380 GW de nueva energía marina en 32 mercados, y casi la mitad provenga de la región de Asia y el Pacífico (APAC), seguida de Europa con un 41 %, América del Norte con un 9 % y Latino América (LATAM) con un 1 %. Sin embargo, también se pronostican posibles cuellos de botella en todas las regiones del mundo (excepto China) para el 2026.

El informe destaca la necesidad de que los gobiernos mundiales establezcan marcos normativos para cumplir sus promesas en el sector de la energía eólica marina, haciendo hincapié en el panorama cambiante de dicha tecnología y su creciente importancia en los sistemas energéticos mundiales. Sin embargo, para cumplir dichos objetivos, además de una regulación normativa, existen otros desafíos que enfrenta tanto la industria como los gobiernos y las partes interesadas a la hora de ampliar la energía *offshore*. Estos desafíos están relacionados con los precios de las materias primas, la reducción de los márgenes y las consideraciones geopolíticas del sector, entre otros, y serán explicados en el punto siguiente.

2.1 DESAFÍOS DE LA INDUSTRIA EÓLICA MARINA A NIVEL MUNDIAL

Uno de los primeros desafíos a los que se enfrenta la eólica marina, entre otras muchas industrias, es la cadena de suministro mundial. En 2021, según el GWEC 2022, se trató de un año récord en la entrega de aerogeneradores marinos, con 3.340 unidades instaladas. Entre los diez proveedores, China se sitúa en primer lugar, seguida de Europa (Dinamarca, Alemania, Francia y también, aunque fuera de Europa, se encuentra UK), Taiwán, Corea del Sur y Japón (ver Figura 2).

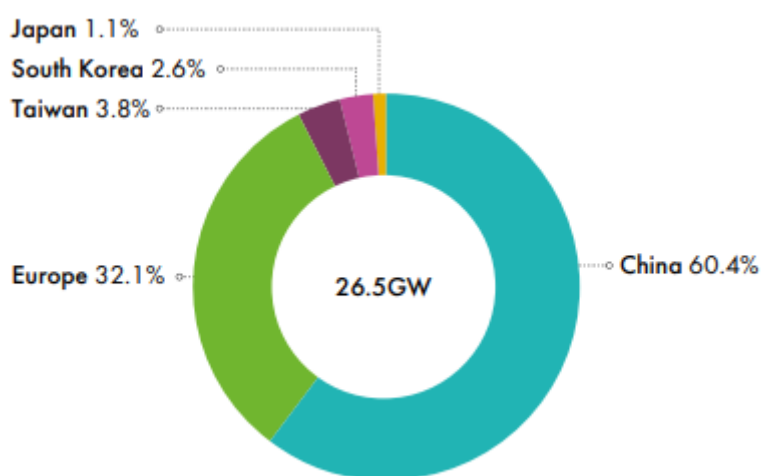


Figura 2. Capacidad mundial de fabricación de aerogeneradores eólicos marinos, 2021 [2].

Esta cadena de suministro se ve presionada por el aumento de los precios de las materias primas y la reducción de los márgenes, lo que está afectando a la rentabilidad del sector y a la competitividad de dicha cadena.

La industria eólica marina necesita invertir con antelación, crecer y entrar en nuevos mercados para satisfacer la creciente demanda mundial. Esto incluye planificar y entregar una primera

generación de nuevos proyectos eólicos marinos flotantes a escala de gigavatios en mercados como Reino Unido, Francia, Corea y Japón.

La siguiente imagen muestra el desglose del LCOE (*Levelized Cost of Energy*) o coste nivelado de la energía de un funcionamiento típico de un parque eólico marino de fondo fijo durante 25 años en 2020. Se observa como el LCOE de la energía eólica marina, gracias a la innovación tecnológica de la industria, ha caído muchísimo. Sin embargo, los últimos años están siendo difíciles en términos de fabricación, con pérdidas debido a los cambios del mercado.

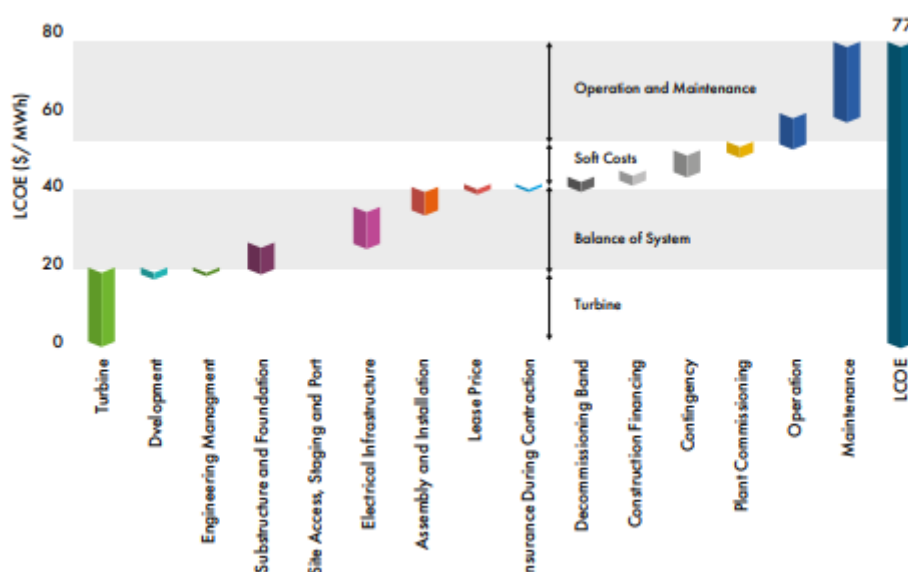


Figura 3. Desglose del LCOE a nivel de componentes para el funcionamiento típico de un parque eólico marino de fondo fijo durante 25 años, 2020 [2].

El sector eólico marino necesita trabajar conjuntamente con los responsables políticos para gestionar los riesgos de la cadena de suministro y crear mercados que protejan a los consumidores y, al mismo tiempo, acelerar los proyectos. Los responsables políticos deben garantizar una cartera de proyectos suficiente para apoyar el crecimiento de la industria y centrarse en ofrecer una cartera sostenible. La sostenibilidad económica también es importante para la transición de este sector. Como ya se ha comentado, la cadena de suministro del sector está presionada por el aumento de los precios de las materias primas y la reducción de los márgenes, lo que dificulta su capacidad para satisfacer la creciente demanda mundial y abordar los desafíos de la descarbonización. Sin embargo, a pesar de estos desafíos, las perspectivas a largo plazo para la energía *offshore* siguen siendo sólidas y es necesario evitar retrasos en la expansión de la industria.

Quizás, el segundo gran desafío de esta industria, que se enfatiza en el informe global mencionado, sea la importancia de las acciones políticas de los gobiernos para facilitar un

rápido aumento de la capacidad eólica marina. Los procesos de arrendamiento¹ eficientes y la liberación de los fondos marinos para su arrendamiento son cruciales para apoyar el crecimiento de la industria y cumplir los objetivos climáticos. Desde el GWEC se ha pedido a los gobiernos que aumenten y aceleren el arrendamiento de los fondos marinos durante la próxima década a fin de crear una cartera más sostenible para los proyectos de energía eólica marina.

Sin embargo, por el momento, la liberación limitada de los fondos marinos está provocando un sobrecalentamiento del mercado, y existe la preocupación de que los retrasos en la concesión de los permisos estén obstaculizando el progreso hacia la consecución de los objetivos de energía eólica marina. En algunos países, ya se está implementando un sistema virtual de ventanilla única para abordar el prolongado proceso de concesión de permisos y arrendamientos. El papel del arrendamiento debe alinearse con las mayores ambiciones y objetivos de energía eólica marina. Se pide, por ello, aumentar la cantidad de fondos marinos arrendados para cumplir con los objetivos climáticos y crear una red de transporte más sostenible para la industria.

En cuanto a los permisos necesarios para llevar estos proyectos a cabo, es necesaria una estrategia coordinada de concesiones para garantizar el éxito del despliegue de la energía eólica marina en todo el mundo. La claridad y la eficacia del proceso de concesiones de permisos desempeñan un papel crucial a la hora de determinar el plazo de entrega y el costo del desarrollo del proyecto. Los gobiernos deben trabajar para establecer requisitos y una gobernanza clara para permitir estos proyectos, a fin de reducir las demoras y agilizar el proceso. De ahí también, la creación de un sistema virtual de ventanilla única ya mencionado, implementado en países como Filipinas. Este sistema pretende agilizar y simplificar el proceso proporcionando una plataforma centralizada en la que los desarrolladores puedan acceder a toda la información y los requisitos necesarios para conceder permisos y arrendar proyectos de energía eólica marina.

El tercer gran desafío a tener en cuenta es la sostenibilidad de esta industria, centrándose en el impacto sobre la biodiversidad y la importancia de garantizar la salud y protección del medio ambiente en el medio marino. La industria eólica marina se posiciona como guardián responsable del océano y se compromete a proteger y mejorar la salud y el medio ambiente, utilizando prácticas responsables. Para garantizar esta protección, se ha creado la planificación espacial marina para energía eólica marina (*Marine spatial planning for offshore*

¹ El arrendamiento en energía eólica offshore es un acuerdo entre empresas y gobiernos para utilizar áreas del lecho marino con el fin de construir y operar parques eólicos. Este proceso incluye la obtención de permisos y derechos para generar energía renovable en alta mar.

wind –MSP-) [6], un marco desarrollado para garantizar el desarrollo eficiente y sostenible de los proyectos de energía eólica marina y, al mismo tiempo, mitigar los conflictos entre los usuarios del océano.

Entre sus objetivos del MSP están equilibrar la creciente demanda de energía eólica marina con la protección de los ecosistemas marinos y la biodiversidad. Implica identificar las áreas adecuadas para los proyectos de energía eólica marina, teniendo en cuenta factores como el impacto ambiental, los usuarios del océano y los requisitos de infraestructura. Es también necesaria una mejor planificación de la red y mejoras operativas para facilitar la integración de la energía eólica marina. Esto incluye tener en cuenta la proximidad de los centros de recarga de energía e implementar plazos de despliegue bien gestionados.

La colaboración entre agentes como el GWEC y el Pacto Mundial de las Naciones Unidas es crucial para desarrollar herramientas y directrices sobre las mejores prácticas para los MSP. Esto influye el uso de tecnologías innovadoras para minimizar el impacto de la energía eólica marina en la vida marina y reducir las perturbaciones durante su construcción. Aquí, el uso de drones, es un gran aliado para reducirlas.

La innovación tecnológica ha sido y es uno de los principales impulsores de la drástica reducción de costes de los proyectos de energía eólica marina, lo que le ha permitido dejar de ser un sector marginal para convertirse en una actividad dominante en el sector energético. La colaboración continua ayuda a impulsar nuevos avances en la industria de la energía eólica *offshore* y superar los desafíos planteados.

2.2 EL MERCADO EÓLICO MARINO

Para contextualizar el mercado, el último informe de GWEC 2023 [3] proporciona una visión detallada del estado del mercado eólico marino en 2022, destacando que fue el segundo año con mayor número de instalaciones eólicas marinas. Sin embargo, las nuevas incorporaciones fueron un 58 % inferiores al año récord que fue el 2021 [2], en el que China se situó en primer lugar a China, seguido de Europa y Asia.

En el 2022 se inyectaron 8.8 GW de nueva energía eólica marina en diferentes mercados. China siguió liderando el desarrollo mundial, a pesar de que sus nuevas instalaciones fueron un 70 % inferior a las de 2021, representando el 57,6 % de las nuevas instalaciones. Esto se debió en gran parte al fin de la tarifa de alimentación (en inglés *Feed in tariff –FiT-*), que terminó a finales del 2021. Aunque sigue habiendo cierto apoyo financiero a nivel provincial, el incentivo es mucho menor que la FiT que ofrecía el gobierno central en años anteriores.

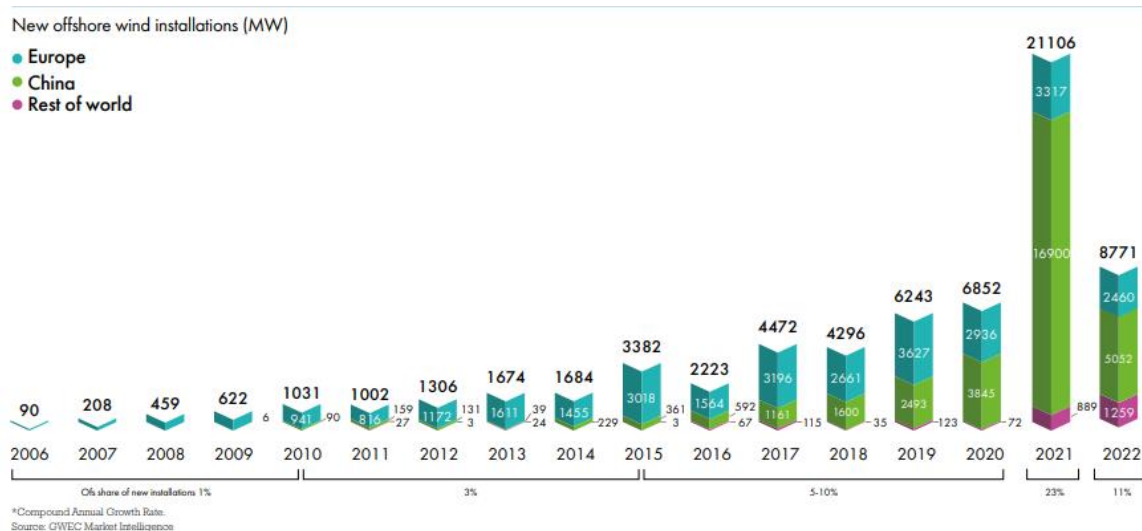


Figura 4. Ratio de nuevas instalaciones de energía marina offshore [3].

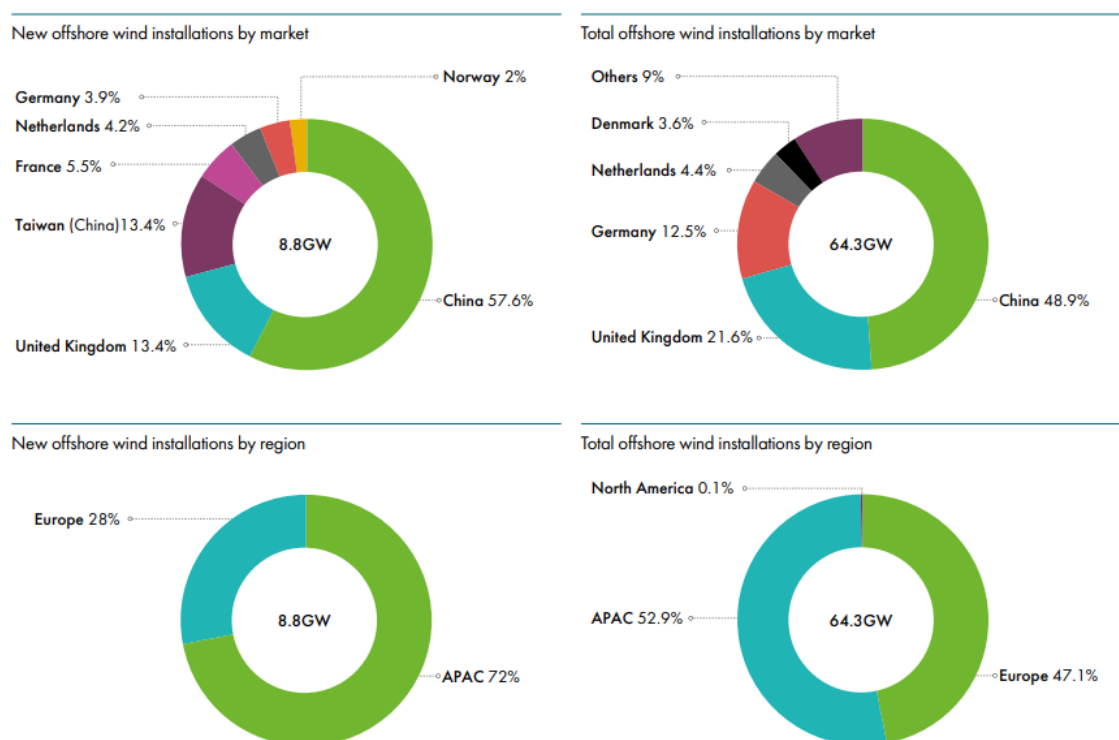


Figura 5. Ratio de nuevas instalaciones de energía marina offshore por mercado [3].

En términos de instalaciones acumuladas, el mercado global ha crecido un promedio del 21 % anual durante la última década, alcanzando un total de 64,3 GW, lo cual constituye el 7,1 % de la capacidad eólica mundial al cierre de 2022. China lidera este crecimiento, afianzando su posición en el mercado y superando al Reino Unido. Otros mercados asiáticos emergentes incluyen Taiwán con 1,4 GW, Vietnam con 0,8 GW, Corea del Sur con 0,1 GW y Japón con 0,1 GW. Asimismo, mercados como Nueva Zelanda y Australia muestran un potencial significativo con 2,3 GW y proyectos de hidrógeno en desarrollo, respectivamente.

Si se hace hincapié en alguno de estos países, se puede observar lo siguiente:

- Reino Unido: actualmente, es uno de los principales mercados de instalaciones eólicas marinas y se espera que siga siendo un actor clave en los próximos años, con ambiciosos planes de expansión y varios proyectos importantes en desarrollo, así como objetivos de capacidad que se extienden más allá del 2030.
- Portugal: es un mercado eólico marino emergente con gran potencial de crecimiento. La costa atlántica de Portugal ofrece condiciones favorables para la energía eólica marina, y se están realizando esfuerzos para atraer inversión y desarrollar la infraestructura necesaria.
- Japón: destinado a crecer rápidamente en el sector de la energía eólica marina. Con su firme compromiso con la energía renovable como parte de su estrategia para reducir su dependencia de los combustibles fósiles, se espera que Japón alcance los 10 GW de capacidad instalada para 2030. Se están promoviendo políticas de colaboración entre el sector público y privado.
- Noruega: a pesar de ser conocido por su industria de petróleo y gas, Noruega tiene el potencial de convertirse en un actor importante en el desarrollo de la energía eólica marina, con varios proyectos importantes en fase de planificación y desarrollo. Se enfoca en la tecnología flotante debido a las profundidades de sus costas y está invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar la viabilidad económica y la eficiencia de la energía *offshore*.
- China: sigue siendo uno de los principales mercados de instalaciones eólicas marinas, con un número significativo de instalaciones eólicas flotantes. Se espera que continúe su crecimiento y siga siendo un actor clave en el mercado de la energía eólica marina. Las políticas gubernamentales de apoyo y la inversión en infraestructuras están impulsando este crecimiento masivo.
- Corea del Sur: se prevé que sea uno de los principales mercados a finales de la década, con ambiciosos objetivos de energía renovable y favorables condiciones eólicas marinas. El gobierno está implementando políticas para atraer inversión extranjera y fomentar la colaboración entre empresas nacionales e internacionales.
- Estados Unidos: con un apoyo creciente al desarrollo de la energía eólica marina y una cartera de proyectos en expansión, se espera que Estados Unidos se convierta en un actor importante en la industria eólica marina. El gobierno está trabajando en políticas para simplificar los permisos y atraer inversión.

- España: identificada como uno de los principales mercados de eólica flotante a finales de la década, con recursos eólicos favorables y un firme compromiso con la energía renovable. España está invirtiendo en proyectos pilotos y en investigación y desarrollo para superar desafíos técnicos y económicos.
- Irlanda: con varios proyectos en desarrollo, el país está enfocado en aumentar su capacidad instalada para cumplir con sus objetivos de energía renovable, aprovechando su ubicación geográfica favorable y las políticas gubernamentales de apoyo para atraer inversión y fomentar el crecimiento del sector.

Además de los países mencionados, existen muchos otros territorios que están haciendo avances significativos en el desarrollo de la energía eólica marina, aunque no se destacan en este documento.

2.3 CONTEXTO DE LA ENERGÍA EÓLICA MARINA EN EUROPA

Para contextualizar a Europa en el ámbito de la energía eólica marina, es importante destacar que Dinamarca instaló el primer parque eólico marino en 1991. La Unión Europea (UE) sobresale como líder global en la producción de componentes esenciales como cimentaciones y cables, y es pionera en el desarrollo de proyectos de energía eólica marina flotante.

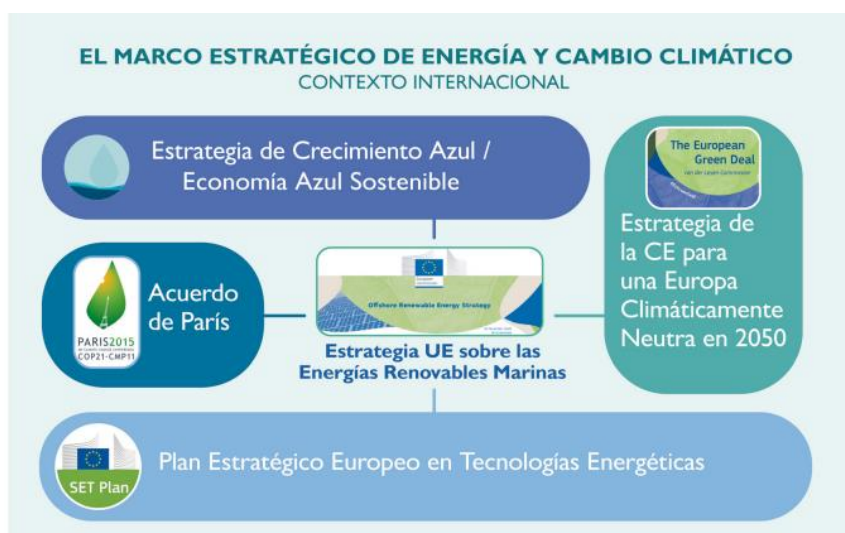


Figura 6. Contexto internacional de la UE de las energías Renovables Marinas [15].

En 2012, se presentó la Estrategia de Crecimiento Azul [7], que englobaba todas las actividades económicas relacionadas con el mar, subrayando la importancia de los mares y océanos para la economía europea. Esta estrategia proyecta que para 2030, la energía eólica marina podría suministrar el 14 % de la demanda eléctrica en la UE. En línea con una visión a

más largo plazo, el Pacto Verde Europeo [8] busca lograr una economía europea climáticamente neutra y competitiva para el año 2050, subrayando el papel esencial de la energía marina.

En noviembre de 2020, la Comisión Europea adoptó la Estrategia de Energías Renovables Marinas [9], con el objetivo de aumentar significativamente la capacidad de producción en eólica marina, energía oceánica y otras tecnologías emergentes para 2050. Las metas incluyen la instalación de al menos 60 GW de energía eólica marina y 1 GW de energía oceánica para 2030, y 300 GW de energía marina y 40 GW de oceánica para 2050.

Para alcanzar estos objetivos, se ha implementado diversas estrategias, incluyendo la cooperación regional e internacional, el desarrollo de una cadena de suministro paneuropea², la mejora de la ordenación del espacio marítimo, y la creación de un marco jurídico claro para movilizar los fondos necesarios y fomentar la transferencia tecnológica de proyectos de investigación a la práctica.

A finales de 2023, la Comisión Europea presentó dos iniciativas clave para la energía eólica:

- El Plan de Acción Europeo sobre Energía Eólica [10].
- La Comunicación sobre la consecución de las ambiciones de la UE en materia de energía eólica marina [11].

Estas medidas tienen como objetivo agilizar la implementación de la energía eólica a través de la concesión de permisos, optimizar el diseño de las subastas, simplificar el acceso a la financiación, fomentar un entorno competitivo a nivel internacional y promover el desarrollo de habilidades profesionales en el ámbito de las energías renovables. Un resumen visual del Plan de Acción Europeo se ilustra en la Tabla 1.

La UE también participa en el *North Seas Energy Cooperation* (NSEC) [12] y del Plan de interconexión del mercado energético del Báltico [13], impulsando la cooperación entre países para desarrollar la energía eólica marina. Europa, con el mayor espacio marítimo del mundo, tiene un potencial significativo para esta tecnología, beneficiando a todos los estados miembros.

² La cadena de suministro paneuropea abarca todas las etapas de producción, desde la fabricación de componentes (turbinas, torres, cables) hasta la instalación y O&M de parques eólicos en alta mar. Implica una red coordinada entre países europeos para optimizar recursos y capacidades industriales.

ACCIONES/INSTRUMENTOS	CATEGORÍA	CALENDARIO
1. La Comisión y los Estados miembros colaborarán para acelerar la concesión de autorizaciones. «Accele-RES», anticipar la transposición y la puesta en ejecución de la DFER revisada. Régimen temporal de emergencia.	Aceleración del despliegue mediante una mayor previsibilidad y una concesión de autorizaciones más rápida	Inicio en noviembre de 2023
2 Los Estados miembros aumentarán la visibilidad de la cartera de proyectos eólicos a través de compromisos eólicos, de la publicación de calendarios de subastas a medio plazo y de planes a largo plazo para el despliegue de renovables.	Aceleración del despliegue mediante una mayor previsibilidad y una concesión de autorizaciones más rápida	Inicio en noviembre de 2023
3. La Comisión adoptará un plan de acción para facilitar la construcción de redes	Aceleración del despliegue mediante una mayor previsibilidad y una concesión de autorizaciones más rápida	Noviembre de 2023
4. Los Estados miembros incluirán en sus subastas criterios cualitativos objetivos, transparentes y no discriminatorios y medidas para maximizar la tasa de ejecución de los proyectos, con el apoyo de una recomendación y orientaciones de la Comisión.	Mejora del diseño de las subastas	Lo antes posible
5. Abordar los riesgos de ciberseguridad y los aspectos relacionados con la protección de datos	Mejora del diseño de las subastas	Inicio a principios de 2024
6. La Comisión aumentará el uso de la contratación estratégica en el contexto de Global Gateway	Mejora del diseño de las subastas	A partir de la adopción
7. La Comisión facilitará el acceso a la financiación de la UE	Acceso a financiación	Antes de final de 2023
8. El BEI proporcionará herramientas de reducción del riesgo y garantías a las empresas eólicas de la UE	Acceso a financiación	Cuarto trimestre de 2023
9. Los Estados miembros harán pleno uso de la flexibilidad que ofrecen las normas sobre ayudas estatales en beneficio de la cadena de valor de la energía eólica de la UE	Acceso a financiación	A partir de la adopción
10. La Comisión reforzará el diálogo con los inversores para fomentar el atractivo de la inversión en el sector eólico de la UE	Acceso a financiación	Antes de final de 2023
11. La Comisión facilitará el acceso de los fabricantes de la UE a los mercados extranjeros	Creación de un entorno internacional justo y competitivo	A partir de la adopción
12. Protección del mercado interior frente a las distorsiones del comercio y las amenazas para la seguridad y el orden público	Creación de un entorno internacional justo y competitivo	A partir de la adopción
13. Mejora de la normalización en el sector de la energía eólica	Creación de un entorno internacional justo y competitivo	Inicio antes de final de 2023
14. Asociaciones a gran escala en materia de capacidades para las energías renovables destinadas a diseñar proyectos que contribuyan al desarrollo de capacidades profesionales en el sector de las energías renovables, incluida la energía eólica	Capacidades	A más tardar a mediados de 2024
15. Carta Eólica de la UE	Compromisos de la industria y de los Estados miembros	Diciembre de 2023

Tabla 1. Resumen del Plan Europeo para la Energía [10].

Las distintas regiones europeas presentan potenciales específicos:

- El Mar del Norte: gran potencial para la energía eólica marina y la energía de las olas y mareas.
- El Mar Báltico: alto potencial para la energía eólica marina y de las olas.
- Países de la UE: potencial alto para la eólica marina fija y flotante, así como para la energía de las olas y mareas.
- El Mar Mediterráneo: potencial alto, sobre todo para la energía marina flotante, mareomotriz y undimotriz.
- El Mar Negro: alto potencial para la energía marina fija y flotante, así como para la energía de las olas.
- Las islas de la UE: pueden desempeñar un papel importante como campos de pruebas y demostración para tecnologías innovadoras relacionadas con esta industria.

En la Figura 7, se muestra el potencial de energía eólica marina en las cuencas marinas accesibles a la UE-27.

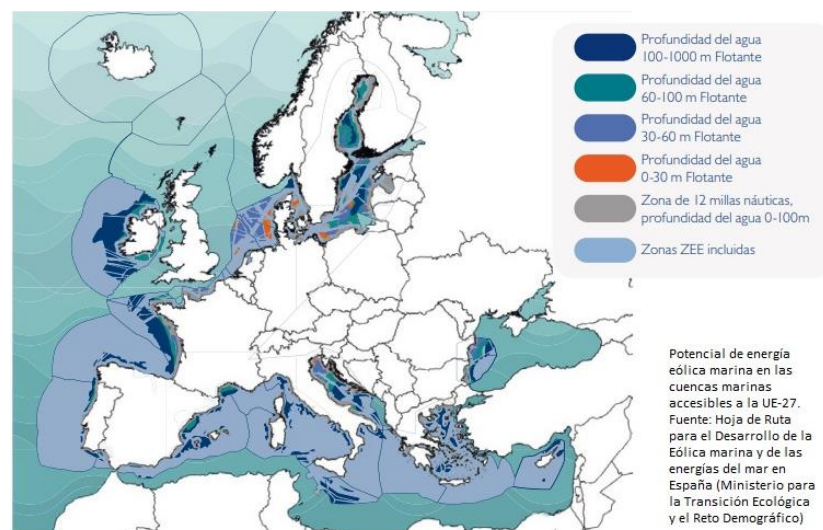


Figura 7. Cuencas marinas UE. Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica marina y de las energías del mar en España. [15].

Basándose en el contexto de mercado y los proyectos disponibles, se muestra también en la Tabla 2, la potencia marina y terrestre instalada en 2023 y acumulada a 31 de diciembre de dicho año en los países miembros de la UE-27.

País	POTENCIA INSTALADA (MW)			POTENCIA ACUMULADA (MW)			CUOTA EN EL MIX (%)		
	Terrestre	Marina	Total	Terrestre	Marina	Total	Terrestre	Marina	Total
Austria	331	-	331	3.885	-	3.885	14%	-	14%
Bélgica	203	-	203	3.231	2.261	5.492	8%	10%	18%
Bulgaria	-	-	-	706	-	706	4%	-	4%
Croacia	156	-	156	1.256	-	1.256	14%	-	14%
Chipre	-	-	-	158	-	158	4%	-	4%
Chequia	-	-	-	337	-	337	1%	-	1%
Dinamarca	54	344	398	4.910	2.652	7.562	32%	24%	56%
Estonia	58	-	58	376	-	376	10%	-	10%
Finlandia	1.278	-	1.278	6.872	71	6.943	18%	-	18%
Francia	1.400	360	1.760	21.950	842	22.792	11%	0%	11%
Alemania	3.567	329	3.896	61.139	8.536	69.675	26%	5%	31%
Grecia	543	-	543	5.226	-	5.226	20%	-	20%
Hungría	-	-	-	329	-	329	1%	-	1%
Irlanda	275	-	275	4.777	25	4.802	36%	-	36%
Italia	525	-	525	12.306	30	12.336	8%	0%	8%
Letonia	-	-	-	137	-	137	4%	-	4%
Lituania	262	-	262	1.208	-	1.208	21%	-	21%
Luxemburgo	42	-	42	208	-	208	-	-	-
Malta	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Países Bajos	527	1.906	2.433	6.754	4.739	11.493	16%	11%	27%
Polonia	1.157	-	1.157	9.383	-	9.383	13%	-	13%
Portugal	79	-	79	5.809	25	5.834	25%	0%	26%
Rumania	72	-	72	3.100	-	3.100	14%	-	14%
Eslovaquia	-	-	-	3	-	3	-	-	0%
Eslovenia	-	-	-	3	-	3	-	-	0%
España	762	2	764	30.562	7	30.569	27%	-	27%
Suecia	1.973	-	1.973	16.249	192	16.441	26%	-	26%
Total EU-27	13.263	2.941	16.204	200.873	19.380	220.253	17%	2%	19%

Tabla 2. Potencia instalada en 2023, potencia acumulada y la cuota de eólica en el mix eléctrico nacional en los países de la UE-27 [14].

El informe creado por WindEurope, Estadísticas 2023 y Previsiones 2024-2030 [14] que es de donde procede la Tabla 2, destaca el papel fundamental que tienen las autoridades nacionales de cada país y el deber de invertir para reforzar y optimizar las redes de transporte y distribución de energía si se quiere mantener los mercados.

En la Figura 8 se presenta los resultados de la Tabla 2 en términos de potencia instalada en el año 2023, tanto para eólica terrestre, como para eólica marina.

En el año 2023, la capacidad instalada de energía eólica marina en la Unión Europea alcanzó números notables, liderada por Alemania, Países Bajos y Suecia. La energía eólica representó el 19 % del mix energético europeo, con un 2 % proveniente específicamente de la eólica marina.

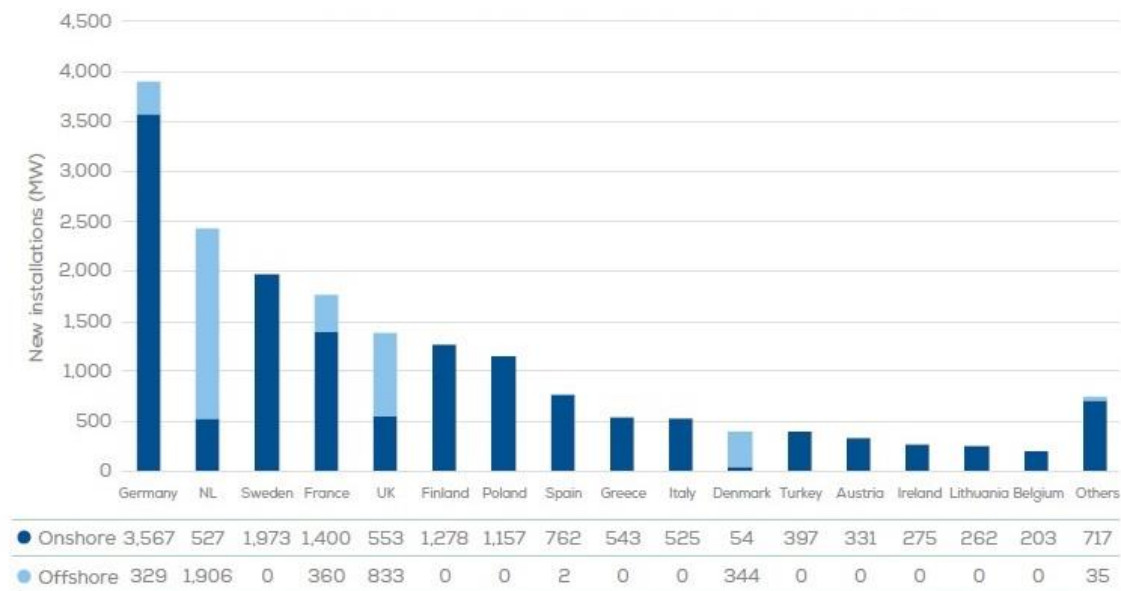


Figura 8. Potencia eólica terrestre y marina instalada en Europa en 2023 [14].

2.4 CONTEXTO DE LA ENERGÍA EÓLICA MARINA EN ESPAÑA

En diciembre de 2021, el Gobierno de España difundió la Hoja de Ruta Eólica Marina y Energías del Mar [15], un documento que define metas y estrategias para consolidar a España como líder europeo en desarrollo tecnológico, innovación ambiental marina, capacidades industriales y la cadena de valor en el ámbito de las energías renovables marinas. Dicha Hoja de Ruta enfatiza el fomento del desarrollo sostenible de estas energías y la creación de un marco nacional robusto para su implementación, contribuyendo así a la descarbonización del país y enfrentando retos como la recuperación económica tras la COVID-19, la transición justa, el reto demográfico y la economía circular.

En línea con este documento, la Asociación Empresarial Eólica (AEE) presentó en octubre de 2022 el Libro blanco de la industria eólica marina en España [16], elaborado por la consultora Deloitte. Este estudio destaca que la eólica marina flotante podría aportar casi 50.000 millones de euros al PIB y crear hasta 17.000 empleos entre 2025 y 2050. España cuenta con una industria eólica, naval y portuaria de primer nivel y con una extensa plataforma continental, lo que otorga una posición privilegiada para el desarrollo de la eólica marina.

El objetivo del Gobierno es alcanzar entre 1 y 3 GW de eólica marina (que sería igual a unos 200 aerogeneradores de 15 MW) y hasta 60 MW de otras fuentes renovables del mar en 2030. Para ello, a comienzos del 2023, se aprobó los Planes de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) [17] que se rige según el Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero. Estos planes zonifican los usos del mar, identificando 19 Zonas de Alto Potencial (ZAP) para la instalación de

aerogeneradores marinos, abarcando aproximadamente 5.000 km² (0,46 % de las aguas territoriales).

Las 5 demarcaciones marinas españolas definidas en el POEM son:

1. Demarcación marina Noratlántica.
2. Demarcación marina Levantino-Balear.
3. Demarcación marina del Estrecho y Alborán.
4. Demarcación marina Sudatlántica
5. Demarcación marina canaria.

Estas zonas, caracterizadas por aguas profundas (de 150 m en zonas como por ejemplo Cataluña o Asturias, hasta los 500 metros o más en otras zonas como Canarias o Andalucía), son ideales para la eólica flotante. Los POEM garantizan la sostenibilidad de las actividades humanas en el mar, facilitar el desarrollo de los sectores marítimos y alcanzar los objetivos que dichos sectores se han fijado. Detrás de este plan, hay un amplio proceso de coordinación interadministrativa y una amplia participación de los agentes interesados y de la sociedad civil mediante procesos de consulta y participación pública.

Aquí, como ya se ha comentado, la energía eólica marina entraría en las zonas categorizadas como ZAP, en las que en este caso tras muchos análisis detallados se han incorporado múltiples variables como son: disponibilidad del recurso eólico, de afección a la biodiversidad marina, a la seguridad en la navegación, a la seguridad aérea, y a la Defensa Nacional y reducción de conflictos entre otros usos. En relación a este plan, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX; Madrid), ha creado una página web donde se puede consultar tanto la información geográfica, como la generada en los POEM o la generada por las administraciones públicas en el ámbito de la aplicación de las directivas europeas con incidencia en el medio marino. Este sistema de información se denomina [INFOMAR](#) [18].

En términos de potencia instalada, España se sitúa en el 5 puesto mundial de energía instalada en tierra firme con una potencia instalada de energía eólica existente que supera los 30 GW a cierre de marzo de 2024 [19]. Sin embargo, las aguas marinas que rodean el país tienen unas profundidades muy elevadas, lo que ha hecho que esta tecnología, no se haya desarrollado al mismo ritmo que la eólica *onshore*. En España, la eólica marina flotante es la alternativa más viable. Sin embargo, se podría decir que la eólica flotante todavía no está del todo desarrollada a nivel comercial, se trata todavía de una tecnología en demostración y los proyectos que haya en torno a ella, requieren una alta complejidad. El oleaje extremo, por ejemplo, sería una de las

principales condiciones de diseño que habría que tener en cuenta [20] y las tareas de mantenimiento y reparación serían más complejas que las que se llevan a cabo en estructuras fijas [21].

Hasta principios del 2023, se habían presentado 45 proyectos de energía eólica marina ante el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), con una potencia total de más de 14 GW. Entre ellos los promotores se encuentran: Bluefloat Energy, Sener, Enerocean, Greenalia, Acciona, Iberdrola, Equinor, Naturgy, RWE, Capital Energy, Ferrovial, Grupo Cobra, Iberblue Wind, Esdras Automática, Saitec, Ocean Winds (EDPR y Engie), Grupo Magtel y Abei Energy. También, Iberblue Wind ha anunciado un parque eólico marino flotante de 990 MW cerca del Estrecho de Gibraltar y en el País Vasco, se está desarrollando un proyecto piloto. Se trata del parque eólico marino Geroa de 45 MW que se va a desarrollar en Vizcaya y cuyo promotor es Saitec.

Un año tras la publicación de los POEM, a inicios de 2024, el MITECO comenzó un proceso de consulta pública para el Proyecto de Real Decreto que regula la producción de energía eléctrica en instalaciones marinas [22]. Dicha normativa contempla las autorizaciones administrativas, el régimen económico y los procedimientos necesarios para su concesión. Afecta a las instalaciones de energía eólica marina y a otras formas de energía marina, como la undimotriz, que generen electricidad en las aguas jurisdiccionales españolas.

Los puntos clave que se detallan en este decreto en relación a la regulación de las subastas de eólica marina son:

- Otorgamiento de forma simultánea, mediante concurso, de la tarifa, la capacidad de acceso a la red y el uso del espacio marítimo por un plazo máximo de 30 años. (En otros países hacen estas adjudicaciones de forma separada).
- La subasta puede incluir hasta un 30 % de criterios no económicos (diseño del proyecto, impacto ambiental y paisajístico, impacto socio-económico, desmantelamiento, etc.).
- Establecimiento de precio de reserva (máximo) y de precio de riesgo (mínimo) que pueden ser confidenciales.
- Requisitos de solvencia técnica, experiencia de la empresa, aspectos económicos-financieros, entre otros.
- Posibilidad de un diálogo público-privado dependiendo de la complejidad del proyecto.

En cuanto a las alegaciones, el proceso estuvo abierto entre el 27 de febrero de 2024 y el 25 de marzo de 2024. El objetivo de estas alegaciones ha sido, entre otros, incluir en dicho RD la participación del territorio en la toma de decisiones y aumentar la ponderación de los criterios no económicos³ en la subasta del régimen económico y de la capacidad de acceso a la red eléctrica para estos proyectos. Algunas de estas alegaciones presentadas hacen mención a:

- Incluir como mínimo, en las comisiones técnicas donde se recogen y evalúan los proyectos, a un representante de las administraciones locales o de la comunidad autónoma donde se instale el proyecto.
- Establecer un diálogo público-privado en el que puedan participar tanto administraciones locales como los sectores que se puedan ver afectados para definir las características y mejoras territoriales y sociales.
- Aumentar el peso de los criterios no económicos del 30 % al 50 % en la valoración y que se tengan en cuenta aspectos vinculados con el diseño del proyecto (distancia a la costa, ratio de ocupación del espacio, divulgación y conocimiento), impacto medioambiental e impacto socioeconómico (desarrollo de la industria y economía de la zona, impacto en el turismo y economía local, compatibilidad con otros usos del espacio).
- Criterios de valoración relacionados con el desmantelamiento de las instalaciones, contribución de la calidad y seguridad de suministro eléctrico de la zona o la seguridad marítima.
- Se pide también que el precio de reserva sea siempre público para aportar transparencia.

Unos meses después, el 24 de septiembre de 2024, se ha aprobado el Real Decreto 962/2024 [23], que regula la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones marinas y que viene alineado con los objetivos que ya había comentado el Gobierno, de alcanzar una potencia instalada de entre 1 y 3 GW para 2030. Además, se contempla una fase de diálogo público entre los promotores de los proyectos y los sectores implicados para maximizar las externalidades positivas y minimizar los impactos ambientales, priorizando la reducción del impacto ambiental en la selección de proyectos y la maximización de los beneficios locales derivados de la energía eólica.

³ La ponderación de los criterios no económicos en energía eólica marina se refiere a la evaluación y priorización de factores como el impacto ambiental, la aceptación social, y la seguridad, junto con los costos, al tomar decisiones sobre proyectos. Estos criterios buscan equilibrar sostenibilidad y beneficios a largo plazo más allá de la rentabilidad inmediata.

España es el socio europeo con más instalaciones de I+D, como la Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN) [24], la Plataforma de Energía Marina de Vizcaya (BiMEP) [25] o la Zona experimental de aprovechamiento de energías marinas de Punta Langosteira, en A Coruña [26], el segundo banco de pruebas del mundo para la energía de las olas.



Figura 9. Prototipo W2POWER en el banco de ensayos de PLOCAN [24].

A raíz de todo este movimiento en torno a la eólica marina y con el objetivo de impulsar y crear sinergias entre empresas nacionales, ha surgido el proyecto LEAF (Liderazgo Español para el Avance de la eólica Flotante) [27]. Dicho proyecto está financiado por la UE y lo componen empresas especializadas en el diseño de plataformas flotantes entre las que se encuentran: ESTEYCO, SAITEC, ENEROCEAN, X1-COREMARINE. Se busca con este consorcio, generar nuevos conocimientos para poder reducir los costes de generación eléctrica de la eólica marina flotante y mejorar así su posicionamiento estratégico a nivel internacional. Entre los trabajos que se quieren llevar a cabo para conseguir sus objetivos son, por ejemplo: desarrollar modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que sean capaces de capturar los efectos viscosos y que sean calibrados desde las primeras fases de diseño para reducir costes y tiempo; diseñar sistemas de conexión rápida eléctrica-mecánica (*hook-up*), que permitirán reducir la duración, coste y riesgos de las operaciones o nuevos conceptos para el sistema de anclaje (anclas) reduciendo el material usado, como son los anclajes multilínea, en el que los anclajes se comparten entre las plataformas, reduciendo su número, inspección y estudios del fondo y también las operaciones de instalación.

2.5 TECNOLOGIAS PARA PARQUES EÓLICOS MARINOS

La eólica marina se define como una fuente de energía renovable que aprovecha la fuerza del viento en alta mar para generar electricidad. Según su infraestructura, puede clasificarse en

eólica marina fija o flotante. La elección entre ambas tecnologías depende de varios factores, siendo uno de los más destacados la profundidad del entorno marino del emplazamiento propuesto. Antes de su implementación, es imprescindible llevar a cabo exhaustivos estudios de impacto ambiental que evalúan aspectos como la caracterización del hábitat, la fauna marina, el ruido, los recursos pesqueros, la acuicultura y el marisqueo, así como el impacto socioeconómico. Estos estudios se complementan con un proceso de audiencia pública que permite la participación de todos los interesados, culminando en la decisión sobre la viabilidad ambiental del proyecto.

Entre los aspectos relevantes se encuentra el impacto visual potencial. En España, las áreas definidas por el POEM están a una distancia promedio de 15,6 km de la costa, lo que generalmente resulta en un impacto visual mínimo. Además, es crucial evaluar los efectos potenciales en la pesca. Aunque los parques eólicos marinos suelen ser compatibles con la mayoría de las técnicas pesqueras, hay excepciones como la pesca de arrastre. Esta técnica, que representa el 9 % de la flota española en aguas nacionales, debe considerarse al seleccionar la ubicación de los parques.

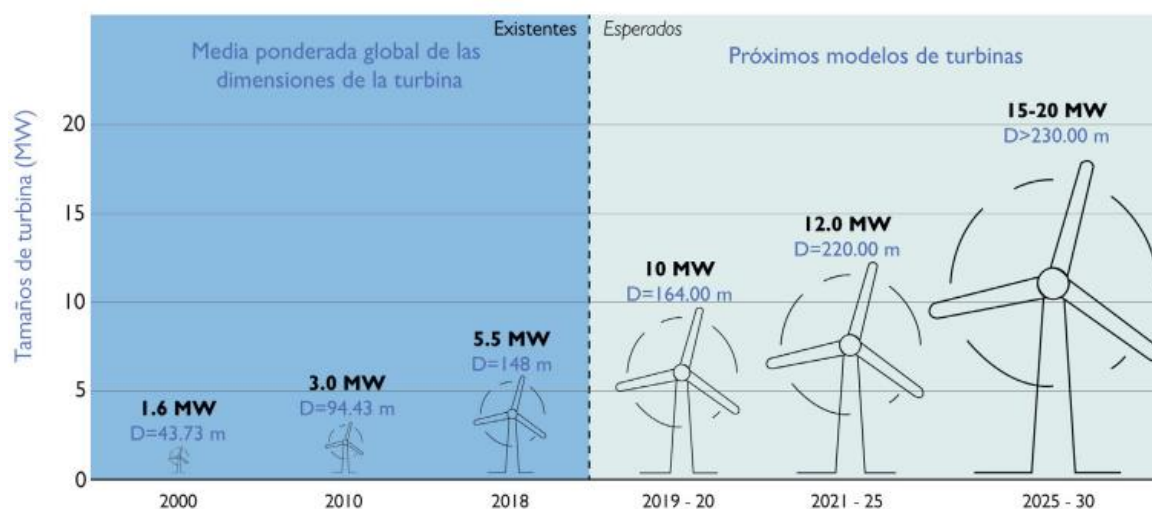


Figura 10. Evolución del tamaño medio de los aerogeneradores. [15].

En cuanto al aprovechamiento del recurso eólico marino, se reconoce su amplio potencial. Debido a que el mar ofrece menos restricciones espaciales que la tierra, se observa una tendencia hacia el incremento en la altura y el área de barrido de los aerogeneradores, como se ilustra en la Figura 10.

Aparte de las cuestiones mencionadas, la estructura soporte juega un papel fundamental en este tipo de instalaciones, así como las técnicas de instalación y montaje.

2.5.1 ESTRUCTURAS FIJAS

En la hoja de ruta de la eólica marina [15] y en el libro blanco de energía eólica [16] se habla de este tipo de estructuras fijas, siendo la primera tecnología que se desarrolló. Estas estructuras reciben también el nombre en inglés de *bottom fixed* y, en definitiva, son aquellas que están ancladas directamente al lecho marino. Pueden obtener diferente clasificación en función de la profundidad a la cual se vayan a instalar y son más adecuadas para ubicaciones con profundidades de hasta aproximadamente 60 m. Atendiendo a dicha clasificación están:

- Monopilote: son la forma más común de estructura fija utilizada en parques eólicos marinos. Consisten en un solo tubo de acero de gran diámetro que se clava en el lecho marino. Este tipo de estructura es adecuada para profundidades de hasta 30 metros y se utiliza en más del 80 % de las instalaciones eólicas marinas actuales. Su principal ventaja es la simplicidad de diseño y construcción, lo que resulta en menores costos de instalación.
- Jacket: las estructuras tipo *jacket* son utilizadas en ubicaciones con profundidades de entre 30 y 60 metros. Estas estructuras consisten en una red tridimensional de tubos de acero que proporcionan una base amplia y estable. Las *jackets* son más adecuadas para suelos marinos más blandos y proporcionan una mayor estabilidad en condiciones de oleaje y corrientes fuertes. Además, son más resistentes a las fuerzas laterales que los monopilotes, lo que las hace adecuadas para ubicaciones con condiciones meteorológicas adversas.
- Trípode: son estructuras similares a los *jackets* pero con tres patas. Se utilizan en profundidades de entre 20 y 50 metros. Estas estructuras proporcionan una estabilidad adicional en comparación con los monopilotes y son más fáciles de instalar que los *jackets*. Su diseño permite una distribución más uniforme de las cargas, reduciendo el riesgo de fatiga del material.
- Tripilote: es un diseño mejorado del monopilote. En este caso, los pilares de acero son conectados por encima del agua mediante una pieza de transición, sobre la cual se monta la torre del aerogenerador.
- Apoyo por gravedad: estas estructuras basadas en gravedad se utilizan en profundidades de hasta 30 metros. Estas estructuras se colocan sobre el lecho marino y se mantienen en su lugar por su propio peso, que suele ser incrementado con la adición de materiales pesados como hormigón. Las *Gravity-Based Structures* (GBS), son adecuadas para suelos marinos duros y proporcionan una gran estabilidad sin necesidad de anclajes adicionales. Sin embargo, su instalación requiere una

preparación cuidadosa del lecho marino y puede ser más costosa que otros tipos de estructuras.

- **Suction Buckets**: sistemas de succión a presión, son de instalación sencilla y rápida ya que se fijan al suelo marino sin necesidad de perforación. Estas estructuras suelen ser abiertas en su extremo inferior que es el que apoya en el fondo marino, se les ejerce una succión para crear una diferencia de presión (vacío) y provocar así su anclaje. El fondo marino tiene que tener una estructura equilibrada (suelos arenosos) para funcionar correctamente. Si hay muchas rocas, no sería adecuado. Los de geometría cuadrada como muestra la Figura 11 se suelen denominar cajones de succión o *suction caissons* en inglés.

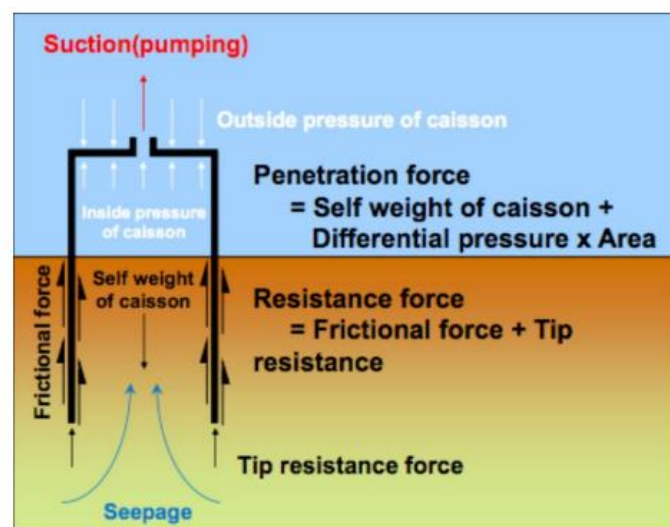


Figura 11. Principios físicos del cubo de succión.

La Figura 12, muestra un resumen de los tipos de cimentación [28].

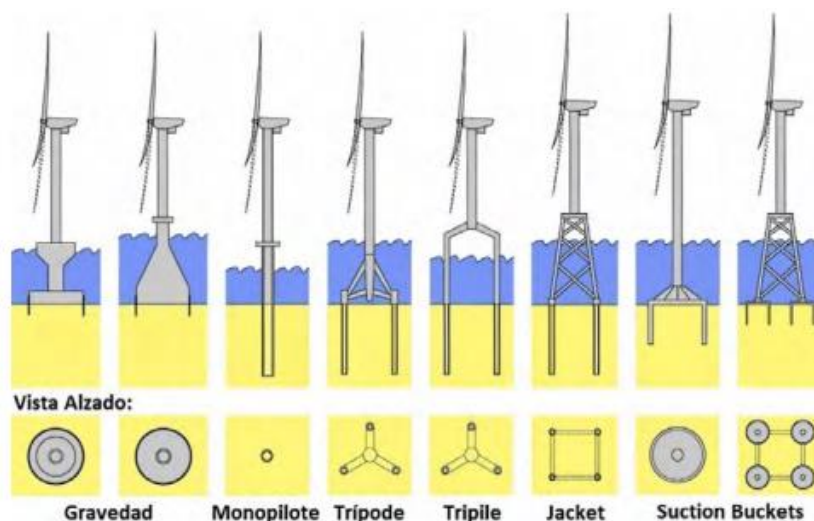


Figura 12. Tecnologías de Cimentación Fija [28].

Hasta hace muy poco, la mayoría de los parques *offshore* se han basado en este tipo de estructuras acumulando una cifra de 29 GW a finales de 2019. Las profundidades de las aguas solían ser menores a 60 metros y cercanas a las costas. Este tipo de estructuras fijas han experimentado avances significativos en I+D+i enfocándose en la eficiencia en costes sin perder sus prestaciones, ni afectar a la seguridad. En Europa la tipología más utilizada hasta 2020 ha sido la *monopile*. En el gráfico de la Figura 13 se puede apreciar la cantidad de aerogeneradores en relación a las diferentes tipologías de estructuras fijas usadas en Europa.

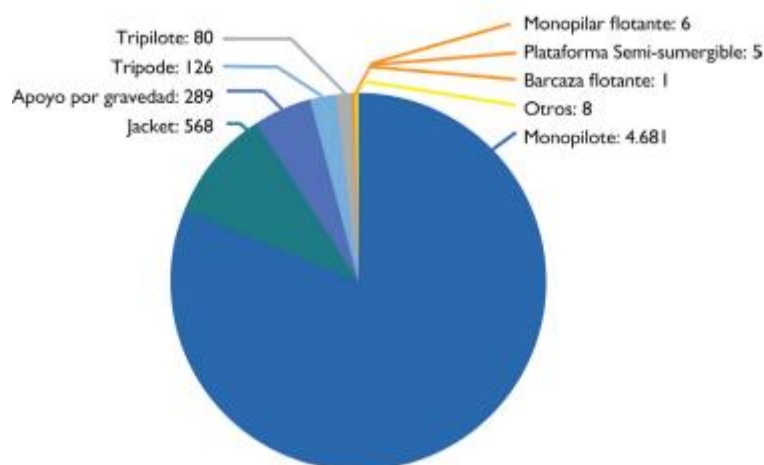


Figura 13. Número acumulado de cimentaciones en Europa a finales de 2020 [14].

A pesar de toda la innovación que se ha ido desarrollando para reducir costes, en ubicaciones con profundidades superiores a los 50 o 60 metros, estas estructuras son prácticamente inviables tanto en lo que se refiere a costes económicos, como a dificultades de instalación y operación. Por ello, surge la idea de estructuras flotantes, las cuales se detallarán en el siguiente punto.

2.5.2 ESTRUCTURAS FLOTANTES

Este tipo de estructura abre la puerta a nuevos emplazamientos que hasta hace poco eran impensables. En Europa, por ejemplo, el 80 % del recurso marino se encuentra situado en aguas a más de 60 m de profundidad. A pesar de sus grandes ventajas, como ya se ha demostrado en algunos proyectos en los que se ha visto aumentado el factor de capacidad, como es el caso de *Hywind* en Escocia [29] o la minimización del impacto ambiental, tienen también sus dificultades técnicas entre las que se encuentra, el tendido de infraestructura eléctrica submarina de evacuación a gran profundidad. Para desarrollar este tipo de tecnología, muchos de los desarrollos que se están planteando se apoyan en gran medida de la experiencia derivada de las industrias del petróleo y del gas, pero aplicándoles ciertas optimizaciones.

Entre los tipos de estructuras flotantes más destacados se encuentran las explicadas a continuación, en la Figura 14. Se está también trabajando en sistemas híbridos de muchas de estas estructuras, que van a ser descritas, para mitigar muchos de los desafíos que supone su optimización:

- Barge: en lo que se refiere a dimensiones, el concepto es similar al de un barco. El tamaño de la manga y eslora es algo mayor al del calado (profundidad de la parte sumergida, hasta la línea de flotación). Hay mucha superficie en contacto con el agua lo que le da estabilidad. Hay veces que tiene placas de arfado para minimizar los movimientos.
- Semisubmersible: en español, semisumergible. Este diseño busca minimizar la superficie expuesta al agua, pero siempre maximizando el volumen. Existen varios cilindros verticales que se unen mediante vigas y tirantes para crear una superficie donde se instala el aerogenerador.
- Spar: la mayor parte del peso va en el punto más bajo para dar estabilidad. Se trata de un cilindro con mucha masa en el extremo opuesto de donde se instala el aerogenerador para mantenerlo vertical. Al crecer el tamaño de los aerogeneradores, tiene que haber cilindros más largos para compensar los pesos, lo que en algunos casos dificulta su instalación y fabricación.
- Tensioned Legs Platform (TLP): es uno de los conceptos más novedosos que hace que una vez que se instale el aerogenerador, la plataforma no flote como tal. Se trata de una columna central con brazos conectados a tensores rígidos. Durante el montaje se deben colocar flotadores temporales para evitar que la plataforma se dé la vuelta, lo que también permite que sea remolcada hasta su ubicación. Una vez en el sitio, se colocan tensionadores y se quitan los flotadores.



Figura 14. Tecnologías de eólica flotante.

En España, debido a la profundidad de sus costas, la eólica flotante es la que tiene una mayor cabida. Además, el impulso de este sector puede impulsar otros sectores como es el caso de los astilleros, las construcciones navales, la ingeniería civil, la industrial del metal, entre otros. Es tal la evolución que está habiendo en este tipo de estructuras, que España se sitúa en el primer puesto, en cuanto a mayor número de patentes en eólica flotante y se asume que los parques eólicos flotantes se instalarán en aquellas profundidades donde las cimentaciones fijas no lleguen, por motivos técnicos o económicos. Sin embargo, también tiene algún punto negativo. Su viabilidad técnica y económica está cuestionada debido a la complejidad de las tareas de mantenimiento en el mar, que requieren condiciones meteorológicas estrictas para garantizar la seguridad [30].

En abril de 2024, los ministros de Escocia aprobaron la construcción del primer parque eólico marino flotante a escala comercial de Europa. El proyecto, denominado Green Volt, incluirá 35 aerogeneradores frente a la costa de Aberdeenshire, capaces de generar hasta 560 MWh de electricidad con bajas emisiones de carbono a partir de 2029. Dirigido por Flotation Energy y Vårgrønn, este proyecto proveerá energía principalmente a las plataformas de petróleo y gas en el Mar del Norte [31].

Conocidos los tipos de estructuras existentes, otro aspecto crucial es el método de transmisión de la energía generada a tierra, detalle que se abordará a continuación.

2.5.3 ENVÍO DE ENERGÍA DE UN PARQUE EÓLICO MARINO

La forma de evacuar la energía producida en un parque eólico marino, depende en muchos casos de la distancia a la que se encuentre de la costa y de la potencia total de la instalación. Esta se debe realizar mediante una adecuada combinación de líneas eléctricas y subestaciones de transformación.

Si se encuentra a gran distancia, la energía se evacua desde su centro de transformación en MT hasta una subestación de distribución, que puede ser flotante o cimentada (llamada subestación *offshore*) y aquí, es donde se eleva en AT hasta otra subestación situada en tierra, donde se distribuye. Si, por el contrario, el parque se encuentra cerca de la costa, una línea eléctrica transporta la energía en MT directamente de los aerogeneradores hasta la subestación en tierra, desde donde se traslada a AT.

Los cables de exportación, que enlazan las subestaciones terrestres con las marinas, se entierran en el lecho marino para prevenir interferencias con otras actividades marítimas y, si son muy profundos, pueden reforzarse con sistemas de colchones. Estos cables tienen una gran capacidad. Por otro lado, los cables *inter-array*, que conectan los aerogeneradores entre

sí, son más pequeños, pero operan a un voltaje aproximado de 66 kV. El coste de estos cables se incrementa con la distancia entre aerogeneradores y disminuye con el tamaño de estos, ya que menos aerogeneradores o aerogeneradores de mayor tamaño implican una menor necesidad de cableado. Sin embargo, el espaciamiento óptimo entre aerogeneradores es un equilibrio entre las pérdidas por estela y el coste del cableado. Así, un mayor espaciamiento requiere más cable y aumenta el coste, pero reduce las pérdidas. Otros factores, como la seguridad en la navegación, también pueden afectar estos costes. Además, en el caso de estructuras flotantes, estas no están fijas en un punto, sino que poseen 6 grados de libertad y pueden desplazarse dentro de un área circular controlada por su plataforma, que también tiene como función proteger a los aerogeneradores de las olas excesivas y condiciones climáticas adversas que podrían causar fatiga en las estructuras.

Los equipos eléctricos que se montan en subestaciones *offshore* son similares a los utilizados en tierra, pero con una protección ambiental adicional ya que un fallo en *offshore*, podría suponer riesgos mayores. En parques muy grandes, incluso se pueden necesitar varias subestaciones *offshore*. La construcción de estas subestaciones se realiza en tierra y luego son transportadas [32].

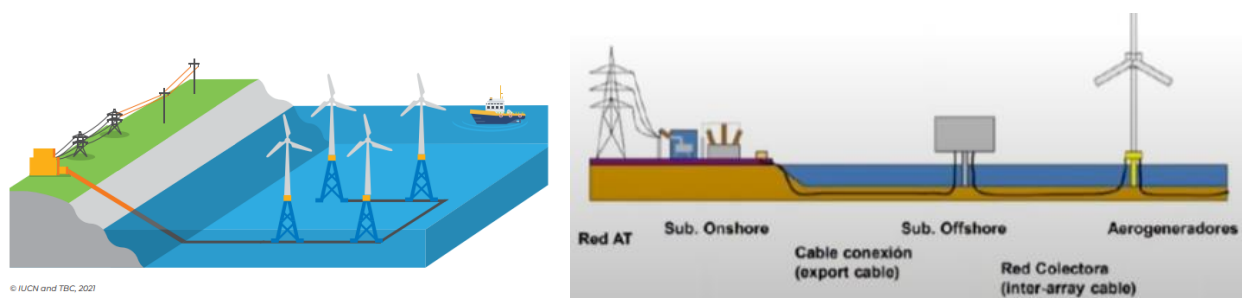


Figura 15. Parque eólico marino sin subestación offshore (izquierda) y parque eólico marino con subestación offshore (derecha).

A veces se han requerido barcos-grúa que son muy costosos, por lo que en ocasiones se ha optado por modelos modulares de diseño o incluso, modelos más reducidos que pueden instalarse en uno de los aerogeneradores sin necesidad de otra cimentación, como el que se muestra en la Figura 16.

Se está trabajando en el diseño de soluciones especiales a medida para una amplia gama de aplicaciones. Se han presentado proyectos en los que los planes son la construcción de subestaciones submarinas, apoyándose en que el agua del mar puede usarse como sistema de refrigeración natural, otros con estructuras de subestaciones flotantes o subestaciones autoinstalables, para minimizar los costes y evitar la necesidad de barcos auxiliares con elevadores o grúas marinas, etc. También es importante los cables utilizados, teniendo

siempre presentes aspectos como la erosión, la presión a la que están sometidos, etc. Estos deben de tener un buen aislamiento para evitar tanto cortocircuitos como pérdidas y un buen aislamiento magnético y resistencia mecánica. Además, en muchos casos en los que las estructuras son flotantes, la matriz del cable es dinámica, por lo que los cables deben estar más protegidos para que no se doblen, ni se rompan debido a los movimientos del aerogenerador. Según la corriente que se quiere enviar y las condiciones del fondo y del entorno, se usará un tipo de cable u otro dando prioridad a ciertas características, así como si la plataforma usada es fija o flotante ya que cada una tiene sus características como se ha venido comentando.



Figura 16. Subestación offshore compacta en torre de aerogenerador.

Las subestaciones *offshore* son fundamentales en los proyectos marítimos, y su diseño y operatividad presentan múltiples desafíos. Estos incluyen la necesidad de cables dinámicos de alta tensión y equipos eléctricos resistentes a los movimientos estructurales. Por ello, se está innovando significativamente en estas estructuras y sus accesorios para transmitir energía a tierra de manera más eficiente, minimizando costos y pérdidas.

2.5.4 COMPONENTES ESTRUCTURALES Y TIPOS DE DAÑOS POTENCIALES

Una vez explicadas las diferentes estructuras de aerogeneradores marinos (fijas y/o flotantes) y cómo se evacua la energía generada por los mismos, es importante hablar también de los componentes clave que los forman, para poder analizar los posibles daños de los mismos.

Las turbinas eólicas marinas están compuestas por varios componentes clave, incluyendo el sistema de amarre, la cimentación, la torre, las palas, la góndola, el convertidor, la caja de cambios, el generador y los cojinetes de orientación. Cada uno de estos componentes está sujeto a diferentes tipos de daños debido a las condiciones ambientales y operativas [33].

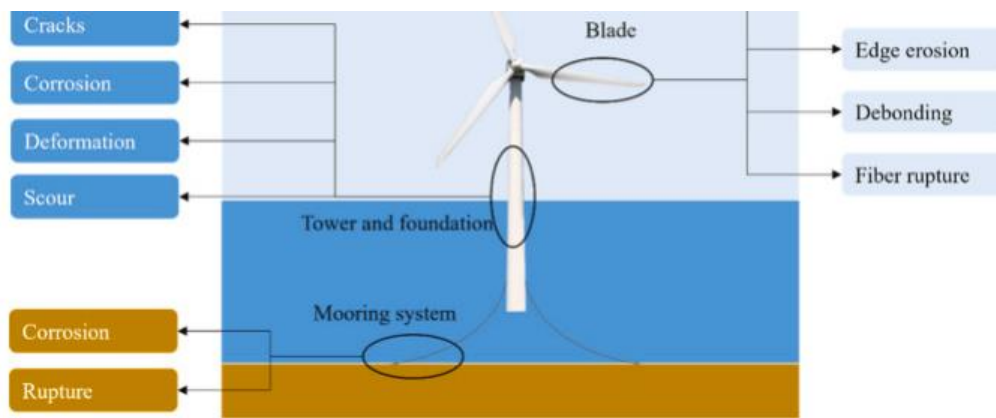


Figura 17. Principales componentes estructurales y daños potenciales [33].

Las cargas dinámicas de vendavales, olas y terremotos pueden causar daños por fatiga en los componentes de estos aerogeneradores. Además, la degradación del material, como la corrosión del acero y el envejecimiento del polímero, puede acelerar el progreso del daño. Las altas concentraciones de iones de cloruro y sulfato en el entorno marino aceleran la corrosión de las barras de acero, mientras que los organismos marinos que se adhieren a los cimientos liberan productos químicos corrosivos que también aceleran el deterioro del material. La identificación temprana de daños es crucial para reducir los costos de mantenimiento y evitar consecuencias catastróficas.

Las palas de las turbinas eólicas están fabricadas generalmente de materiales compuestos ligeros y resistentes, como fibra de vidrio o carbono reforzada. Estos materiales son esenciales para soportar las altas cargas aerodinámicas y se diseñan para maximizar la captación de energía, pero también son susceptibles a erosión, grietas, desprendimientos de capas y rupturas de fibras, especialmente en las áreas del borde de ataque debido al impacto del viento y las partículas en suspensión en el mar. La erosión del borde de ataque se suele producir por el impacto constante de partículas, sal y agua. Las grietas y defectos estructurales, suelen ser debidas a la fatiga del material y a los cambios de temperatura, y las rupturas de fibras o delaminación es debida a que, al estar formadas por materiales compuestos, estos tienden a separarse.

La góndola o *nacelle*, es el compartimento que alberga los sistemas clave de generación de electricidad, como el generador, la caja de engranajes y el transformador y se encuentra expuesta a condiciones extremas de viento y humedad marina, lo que puede causar corrosión, desgaste de componentes mecánicos y daños por vibración en los sistemas internos. Igualmente, las vibraciones y fricciones generadas por los sistemas de transmisión pueden provocar desgates excesivos en los rodamientos y engranajes internos.

La torre por otro lado, soporta el peso del rotor y la góndola, distribuyendo las cargas mecánicas hacia la cimentación. La mayoría de las torres están hechas de acero y en este caso, están sujetas a fenómenos de corrosión y deformación estructural debido a la salinidad del entorno marino y las cargas dinámicas de viento y olas y en algunos casos, a posibles impactos durante las operaciones de montaje o mantenimiento debido con objetos flotantes.

Por otro lado, están las cimentaciones, que como ya se ha comentado, varían según la profundidad del mar y el tipo de suelo marino. En el caso de cimentaciones flotantes, que están ancladas mediante sistemas de amarre (cadenas, cables, etc.), se enfrentan a desafíos adicionales como corrosión acelerada, agrietamientos y fatiga por las fuerzas de las olas y las mareas, debido a que su exposición a las condiciones del medio marino es continua y se producen movimientos repetitivos que provocan su desgaste.

El artículo *Review of robot-based damage assessment for offshore wind turbines* [33] muestra una tabla resumen, como la Tabla 3, con los posibles daños estructurales en los componentes de los aerogeneradores marinos.

COMPONENTES	POSIBLES DAÑOS ESTRUCTURALES
Pala	Grietas, deslaminación, ruptura de fibras, erosión del borde, delaminación, desprendimiento de la carcasa y la punta, fallo de la unión, pelado interlaminar y corte
Cimentación	Grietas, corrosión, socavación y deformación
Torre	Grietas, corrosión, socavación y deformación
Sistema de amarre	Corrosión y ruptura
Góndola	Grietas y corrosión
Convertidor	Corrosión y suciedad
Caja de cambios	Corrosión y suciedad
Generador	Corrosión y suciedad
Rodamientos de guiñada y paso	Corrosión y suciedad

Tabla 3. Resumen de posibles daños estructurales en el aerogenerador [33].

2.5.5 TÉCNICAS ACTUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PARQUES OFFSHORE

Las actividades O&M en el ámbito de la generación eólica marina son de especial importancia debido a las particularidades del entorno marino y la complejidad de las estructuras *offshore*. Está habiendo una especialización por parte tanto de los transportes navales, como de las infraestructuras portuarias ya que las O&M no solo son importantes en las fases iniciales, sino también durante todo el proceso para poder aplicar posibles correctivos y atender a averías y

emergencias, así como en las fases de desmantelamiento que se llevan a cabo pasados unos 25-30 años. El final los costes de O&M pueden suponer entre el 25-30 % de los costes del ciclo de vida.

En el entorno marino, diversos factores como la erosión, el constante impacto de las olas, las condiciones climáticas adversas y la vibración estructural debido al movimiento del mar, como ya se han comentado en el apartado 2.5.4., contribuyen al desgaste y fallos de las instalaciones. Por lo tanto, es esencial establecer rigurosas rutinas de mantenimiento y control de eventos en las plataformas de *offshore*. La monitorización remota y las visitas frecuentes son propuestas clave para mejorar la recopilación de datos y garantizar la supervisión adecuada del estado de la instalación [34].

Las grandes dimensiones de los aerogeneradores *offshore* aumentan la complejidad en estas operaciones de mantenimiento, especialmente en alta mar. Esto siempre ha venido planteando retos técnicos y de especialización, así como requisitos más exigentes en términos de seguridad. Los sistemas de control, mando y sensorización deben ser más exigentes para un mantenimiento preventivo mucho más optimizado. Todo esto requiere en muchos casos, soluciones tecnológicas más avanzadas.

La O&M de los parques eólicos *offshore* constituyen en si un desafío técnico de gran magnitud. A lo largo de los años, las técnicas tradicionales para la inspección, monitoreo y reparación de infraestructuras eólicas han sido la base del mantenimiento de estas instalaciones y hoy en día, en muchos casos, siguen desempeñando un papel crucial, sobre todo en zonas de difícil acceso o en casos donde las tecnologías emergentes no han sido completamente implementadas. En este punto, se van a describir las principales técnicas utilizadas en la operación y mantenimiento de parques eólicos *offshore*, con énfasis en su relación con los componentes estructurales y los tipos de fallos más comunes en estas infraestructuras, comentados en el punto 2.5.4:

- Inspección visual directa: la inspección visual sigue siendo una de las técnicas más comunes para detectar daños superficiales en las palas, torres, y cimentaciones de los aerogeneradores *offshore*. Los equipos de mantenimiento, que suelen incluir técnicos especializados, acceden a estas máquinas mediante helicópteros o barcos, utilizando cuerdas o grúas para escalar las torres y examinar posibles daños por corrosión, grietas o erosión en las palas. Aunque este método ofrece una evaluación visual inmediata, es altamente dependiente de las condiciones climáticas, lo que limita su efectividad en entornos marinos hostiles.

- Inspección ultrasónica: en las palas y cimentaciones, la técnica ultrasónica es ampliamente utilizada para detectar defectos internos, como delaminación o grietas dentro de los materiales compuestos. Esta técnica permite identificar fallas que no son visibles desde el exterior y que podrían comprometer la integridad estructural si no se reparan a tiempo. Sin embargo, requiere equipos especializados y personal capacitado para interpretar los datos, y puede ser menos eficiente en superficies muy rugosas o en condiciones de humedad alta.
- Métodos de inspección basados en radiografía: para componentes como las cajas de engranajes y los motores alojados en la góndola, los rayos X son útiles para identificar grietas internas o fallas en componentes mecánicos que están sometidos a fatiga cíclica y vibraciones constantes. La inspección por radiografía permite detectar microgrietas en una fase temprana, pero requiere que los componentes estén detenidos y el acceso a estos puede ser limitado debido a la ubicación en alta mar.
- Inspección por partículas magnéticas: Esta técnica es tradicionalmente utilizada en los componentes de acero de las torres y cimentaciones. Se basa en la magnetización de las áreas a inspeccionar y en la aplicación de partículas ferromagnéticas para identificar grietas superficiales o internas. Es particularmente efectiva para detectar grietas por fatiga en estructuras de acero, como las soldaduras en las torres y bases.

2.5.6 TENDENCIAS FUTURAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PARQUES OFFSHORE

A medida que la industria eólica *offshore* se expande, surgen tecnologías avanzadas que prometen optimizar las labores de O&M en entornos marinos. Los desafíos estructurales y ambientales asociados a las infraestructuras *offshore* han motivado la búsqueda de métodos más eficientes y seguros para garantizar la longevidad de los componentes estructurales, reducir los fallos y mejorar el rendimiento de los parques eólicos. En este contexto, las técnicas avanzadas están enfocadas en la automatización, la inteligencia artificial, los sistemas robotizados y la digitalización del proceso de mantenimiento, lo que supone un cambio significativo respecto a las metodologías tradicionales. En temas de inspecciones tanto visuales, como técnicas, el uso de nuevas tecnologías como es el caso de vehículos aéreos no tripulados (drones) o sistemas de inspección submarina, están cobrando gran interés. Estas tecnologías permiten evaluar el estado de las palas y de las estructuras submarinas, de manera más eficiente, sin costes tan elevados y con menor riesgo para el personal técnico [34].

En estos proyectos de gran envergadura, la planificación y ejecución de actividades de mantenimiento preventivo para garantizar el funcionamiento eficiente de los aerogeneradores son muy importantes. Abordar la reparación y el reemplazo de algún componente puede

suponer unos costes muy elevados, incluyo la necesidad de trasladar de nuevo el aerogenerador a tierra para dichas intervenciones con todo lo que conlleva. De aquí que el tema de la logística y suministros tenga también un hueco muy importante en esta fase de operación y mantenimiento. Debe haber buena coordinación logística, para asegurar el suministro eficiente de repuestos y materiales necesarios para el mantenimiento. Los drones ayudan a reducir la cantidad de veces que el personal necesita viajar o trepar por los aerogeneradores, así como la cantidad de equipos de elevación pesados necesarios para trabajos de inspección [35].

En cuanto a las condiciones meteorológicas y la seguridad, una buena vigilancia de dichas condiciones es esencial para prever eventos climáticos que puedan afectar a las operaciones de los aerogeneradores e implementar protocolos de seguridad tanto personales como de las operaciones en caso de condiciones adversas.

El uso de tecnologías robóticas, como los drones, puede contribuir a reducir costes y mejorar la seguridad sobre las actividades de operación y mantenimiento. Sin embargo, también hay que tener en cuenta el cumplimiento normativo y ambiental de cada territorio, ya que cada país y cada zona puede tener distintas regulaciones y siempre se deben implementar prácticas sostenibles y minimizar el impacto ambiental.

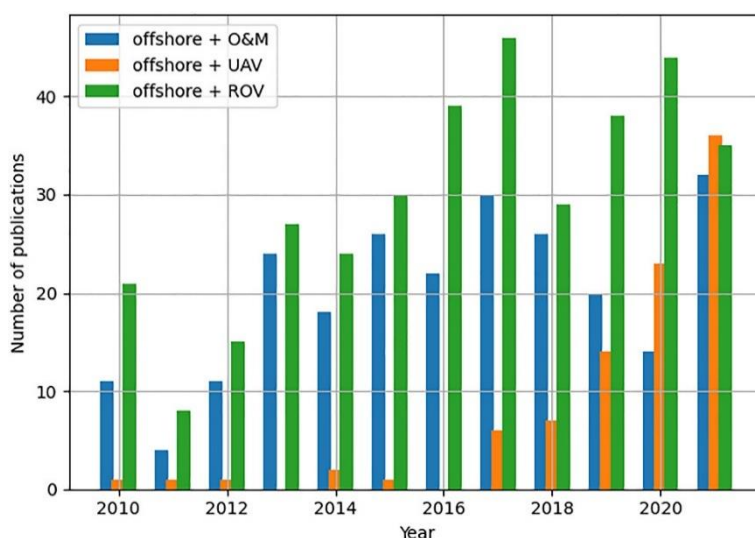


Figura 18. Tendencias de publicaciones que usan ROV - UAV para actividades de O&M en alta mar [36].

En el artículo titulado *Applications of robotics in floating offshore wind farm operations and maintenance: Literature review and trends* [36], se realizó una revisión exhaustiva de la literatura sobre las aplicaciones robóticas en la operación y mantenimiento de parques eólicos marinos, incluyendo el uso de drones. A partir de esta revisión, se generaron gráficos como el presentado en la Figura 18, que ilustran las tendencias en el uso de vehículos operados

remotamente (ROV) y Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) para actividades de operación y mantenimiento en alta mar.

El gráfico muestra una tendencia general de aumento en el número de publicaciones que abordan el uso de ROV y UAV para operaciones y mantenimiento en offshore desde 2010, lo que refleja su creciente adopción en este campo. Este incremento se debe en gran medida a su avanzada capacidad de automatización. En la Tabla 4 se muestra a modo resumen, las actividades de O&M en parques eólicos offshore flotantes, así como las tecnologías robóticas que se utilizan o se pueden utilizar en estas tareas y los sensores utilizados para conseguirlo, sacada de [36].

Y a modo visual, en la Figura 19 se ilustra lo resumido en la Tabla 4, donde se puede ver un sistema integral de inspección de parques eólicos *offshore* utilizando tecnología robótica y drones [35]. En dicha imagen, se muestran drones (UAV) equipados con sensores de alta precisión (cámaras de alta resolución y térmicas) que se encargan de realizar inspecciones aéreas para detectar fallos en las palas y otras partes del aerogenerador. Estos drones son capaces de identificar grietas, desgastes u otros problemas estructurales, mejorando la eficiencia de la inspección al evitar la necesidad de subir técnicos a la estructura. También se puede observar un dispositivo robótico en la base de una de las palas de la turbina, realizando inspección ultrasónica, que es utilizada para detectar fallas internas en los materiales, como fisuras o desgaste interno, que no son visibles externamente. Este tipo de inspección es esencial para evaluar la integridad estructural de las palas y componentes críticos que están sometidos a grandes esfuerzos. Otros drones están desplegados alrededor del aerogenerador, operando en un modo de vigilancia continua, enviando datos en tiempo real a las estaciones de monitoreo en tierra o a un barco cercano. Estos UAV pueden actuar de manera autónoma o ser operados remotamente desde la costa o el barco. La Figura 19 también muestra un barco que está asociado con las operaciones de inspección. En muchos casos, los barcos de soporte están equipados con tecnología de monitoreo y control para supervisar el funcionamiento de los drones y proporcionar mantenimiento a los equipos offshore. El barco puede estar conectado al sistema de datos para recoger y procesar la información generada por los UAV y otros robots, integrando diferentes tecnologías de inspección. En la parte inferior de la imagen, se representa la inspección de las estructuras submarinas mediante ROV. Estos dispositivos se encargan de evaluar el estado de las bases de los aerogeneradores, lo cual es crucial para detectar corrosión o erosión del suelo.

ACTIVIDAD DE O&M	SISTEMA ROBÓTICO	CARGA TÍPICA/SENSORES	VIABILIDAD
Inspección de palas	UAV	Fotogrametría, evaluación con video y cámara termográfica	Alta - UAVs ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, alto TRL
Inspección de palas	Robots trepadores	Imagen ultrasónica, NDT	Baja - montaje y control desafiantes, bajo TRL para adopción a gran escala
Inspección de torre	Robots trepadores	Fotogrametría, sensores ultrasónicos	Media - beneficios en términos de pruebas de fatiga, monitoreo de salud estructural y de lechada
Inspección de torre	UAV	Imagen visual y térmica	Media - escaneo 3D de la sección transversal de la torre
O&M de góndola	Robots residentes	Pinzas, imagen visual	Baja - sistemas residentes dentro de la góndola para inspecciones menores
O&M de góndola	UAV	-	Media - UAV desplegar pequeñas cargas útiles para asistir al personal
Mapeo batimétrico	ROV	SONAR	Alta - ampliamente utilizado en operaciones marinas
Mapeo batimétrico	ASV	SONAR, GPS/IMU para navegación autónoma	Baja - desafiante en términos de navegación a gran escala de ASV
Inspección de cables de matriz/exportación	ROV, AUV	Cámara, pinzas	Alta - uso incrementado de ROV en detección de fallos e inspección de fatiga en subcomponentes
Entierro de cables de exportación	ROV	Cámara, pinzas	Alta - inspección de defectos y fatiga en subcomponentes
Crecimiento marino estructuras submarinas	ROV	SONAR, evaluación de video	Alta - ampliamente utilizado en operaciones marinas
Estudio metoceanico	ROV	Cámara, luces	Media - ampliamente utilizado, se deben tener en cuenta las regulaciones
Transporte de componentes	ASV	Enlace de datos, alimentado por batería	Baja - está sujeto a regulaciones y aprobaciones de zona, requisitos avanzados de navegación para control y coordinación de flotas
Centro operativo en alta mar	ASV	Enlace de datos, alimentado por batería	Baja - buques madre autónomos pueden desplegar UAV y ROV, limitadas debido a requisitos de navegación y comunicación de datos

Tabla 4. Aplicación de la robótica para actividades clave de O&M específicas de parques flotantes. [36].

Estos sistemas robóticos ofrecen ventajas clave para la inspección y mantenimiento como son: la automatización de procesos de inspección, la reducción de riesgos humanos al minimizar la necesidad de trabajo manual en condiciones peligrosas y el monitoreo en tiempo real para la optimización del mantenimiento y la operación. En la siguiente sección se analizarán estos tipos de drones y sus diversas aplicaciones.

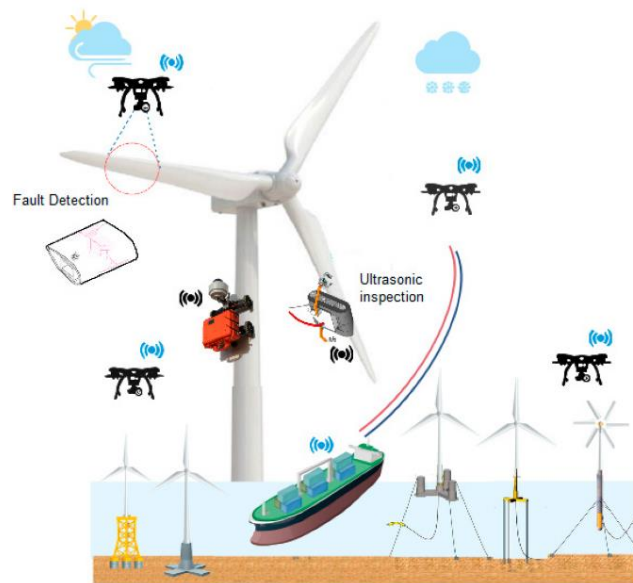


Figura 19. Plataformas robóticas para la inspección de parques offshore [35].

3 DRONES (UAV)

Los UAV son aeronaves que pueden ser pilotadas de forma remota o de manera autónoma. La tecnología y las capacidades de los UAV han evolucionado significativamente, y su uso se ha extendido a una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la industria energética.

Como se ha mencionado a lo largo de este documento, la industria *offshore* está siendo revolucionada por tecnologías remotas. En la era de la transformación digital, tecnologías como los vehículos de superficie no tripulados, drones, robótica, ROV y AUV están transformando la industria energética *offshore*. Estas innovaciones han reducido los costos operativos, mejorado la seguridad y eficiencia en las operaciones de O&M, y hecho la industria más sostenible, diversa y resiliente.

Equipados con múltiples sensores, como se ha comentado brevemente en secciones anteriores, los drones permiten realizar inspecciones visuales detalladas sin exponer al personal a riesgos. Estas tecnologías, combinadas con algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes, facilitan la detección automatizada de fallos en tiempo real, lo que disminuye la necesidad de intervenciones humanas y permite una planificación más eficiente del mantenimiento preventivo.

3.1 DRONES PARA LA INSPECCIÓN DE PARQUES OFFSHORE

En el sector eólico, los drones pueden volar alrededor de las plataformas para inspeccionar visualmente las palas, torres y otros componentes de los aerogeneradores. Además, la capacidad de realizar monitoreo remoto, permite la detección temprana de posibles problemas, acelerando la toma de decisiones por parte de ingenieros y técnicos.

Para las inspecciones submarinas, se utilizan AUV y ROV, los cuales evalúan las estructuras sumergidas sin necesidad de equipos de buceo costosos, reduciendo el riesgo laboral al minimizar la exposición de los trabajadores a entornos peligrosos. Los datos e imágenes recogidos por los drones, combinados con algoritmos de inteligencia artificial, permiten identificar patrones y predecir posibles fallas, optimizando así las estrategias de mantenimiento.

A pesar de estos avances, la adopción masiva de drones para inspecciones en plataformas *offshore* aún no se ha materializado por completo. La IA está ayudando a cambiar este paradigma, reduciendo costos, aumentando la eficiencia y mejorando la seguridad. Esta tecnología también está superando barreras tradicionales, como la necesidad de pilotos expertos y las limitaciones de visibilidad y espacio en condiciones climáticas adversas.

Las plataformas *offshore*, que presentan desafíos de accesibilidad, están siendo gestionadas mediante drones autónomos que no dependen del GPS. Estos drones pueden navegar sin interrupciones en entornos sin señal, utilizando visión por cámara, lo que les permite operar más allá del alcance de los satélites. Gracias a esto, las inspecciones se realizan de manera rápida y precisa sin necesidad de detener las operaciones, generando datos consistentes y mapas 3D que ayudan a identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en reparaciones costosas.

Uno de los artículos mencionados en la sección anterior [36], presenta un diagrama que se muestra en la Figura 20 que muestra las tareas de O&M basadas en drones o sistemas robóticos, y las posibles brechas de investigación sobre las que se debe y ya se está investigando. El diagrama se divide en tres columnas principales, en las que cada una representa aspectos de O&M. Por un lado, el generador de la turbina eólica, por otro la logística marina y, por último, el balance de planta. En color gris están las áreas ampliamente investigadas y en color anaranjado las posibles lagunas en la investigación. Dentro de las diferentes ramas, se hacen también diferentes divisiones que quedan muy bien representadas en el diagrama y que se irán desarrollando a lo largo de este documento bajo las explicaciones de los nuevos avances sobre los que se están trabajando dentro del mundo de la robótica en un entorno tan desafiante como es la energía eólica *offshore* entre otras.

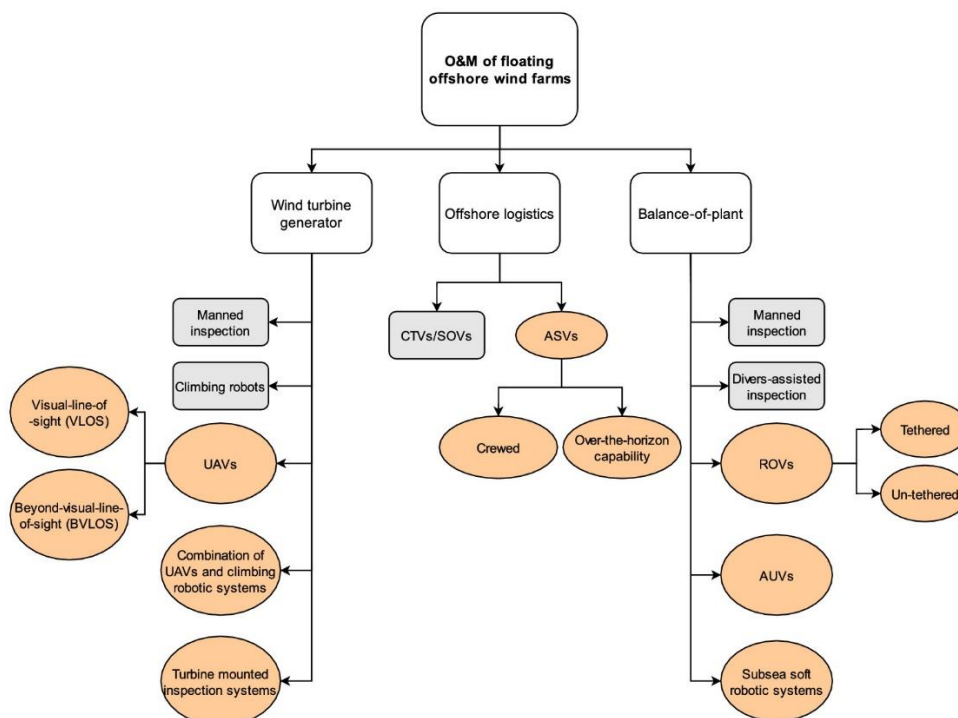


Figura 20. Investigación relacionada con la robótica para O&M. Áreas rectangulares (en gris): ampliamente investigadas. Áreas elípticas (anaranjado): posibles lagunas en la investigación [36].

Si bien existen diferentes tipos de sistemas de drones, como se muestra en la Figura 20 que pueden ayudar en las tareas de O&M, estos deben cumplir también con ciertos factores claves para completar con éxito estas tareas. Entre ellos se encuentran:

- Tiempo de vuelo y nivel de autonomía: es un factor importante a tener en cuenta al elegir un dron. Cuanto mayor sea el tiempo de vuelo y su nivel de autonomía, más datos se pueden recopilar en la misma cantidad de tiempo y mejores predicciones se podrán llevar a cabo, para mejorar las tareas de O&M. Cada vez se está tendiendo más a sistemas altamente autónomos. Sin embargo, esto en muchos casos depende de las tareas a realizar y de las condiciones del entorno.
- Impermeabilización: muchos de los trabajos que se llevan a cabo, pueden requerir que el dron se utilice en condiciones adversas y, además, en ambiente más corrosivo como es el marino, por lo que la impermeabilidad juega un papel muy importante para alargar la vida útil del equipamiento, que debe llevar componentes certificados para uso náutico.
- Tamaño y peso: es otro factor a considerar. Se busca que tenga un tamaño adecuado como para poder acoplar los sensores necesarios y a la vez no sea excesivamente grande ni pesado. Es decir, es imprescindible que mantenga un equilibrio entre su peso y su carga útil con la capacidad de carga del sistema. Además, existen diferentes normativas según el país en cuanto al tamaño y peso de los sistemas aéreos no tripulados. Los ROV por el contrario, tienden a ser más pesados y grandes ya que necesitan navegar en fuertes corrientes y requieren más propulsión y potencia.
- Condiciones meteorológicas del emplazamiento: en la mayoría de los casos, el viento no sopla siempre con la misma intensidad y en la misma dirección. Volar en contra del viento obliga al motor a esforzarse más y a consumir más batería. Igualmente, si las temperaturas son muy bajas, la batería dura aún menos. Al volar con un dron en un día ventoso, la estabilidad durante el vuelo y la autonomía es lo que más se verá afectado, pero no lo único. No todos los drones son iguales y su comportamiento hará que sea más o menos estable en condiciones adversas. Uno de los factores que más influye es su peso. Los drones más ligeros se ven más afectados por el viento. Un dron que cuente con un mejor sensor de viento y sensores anticolidión, nos permitirá volar con seguridad, con vientos más fuertes.
- Comunicación a larga distancia sin control visual del dron: sobre este punto, los drones operan cada vez más en áreas más allá del campo visual del piloto (que en inglés sería *Beyond Visual Line of Sight* -BVLOS). Los controles remotos convencionales tienen un

alcance limitado y en algunos casos, las redes móviles utilizadas para comunicarse con drones autónomos no tienen una conexión estable. En sitios alejados, la falta de cobertura de la red suele ser una explicación de las interrupciones. Se han realizado muchas investigaciones para desarrollar modelos lo suficientemente robustos, para tener altos niveles de confiabilidad de los vuelos, utilizando nuevos protocolos. Un ejemplo de ellos es el proyecto SUCOM (*Superior UTM Communication System*) [37]. En este caso, el objetivo de este proyecto era desarrollar un sistema de comunicación basado en la última tecnología 4G y 5G, usando un sistema multiantena y optimizando los flujos de datos transmitidos. Este sistema permite que la información crítica para la seguridad como es: las coordenadas, dirección de vuelo, velocidad, etc., puedan transmitirse sin interrupción. Para ello, fue probado con éxito en una de las zonas forestales del norte de Brandeburgo, siendo este uno de los mayores puntos muertos de la red en Alemania, sin perder la conexión en ningún momento del vuelo. Además, el uso de tecnología satelital, que se puede utilizar si falla la conexión, ayuda a mantener una buena conexión en todo momento.

- Control del dron: hay muchas aplicaciones que se utilizan para controlar los drones. Algunas de ellas son: *Cloud Ground Control* (CGC) [38] que se trata de una solución de comando y control basada en la nube, de última generación, para operadores y fabricantes de vehículos aéreos, terrestres y marítimos no tripulados. CGC permite a los pilotos de misiones configurar, monitorear y administrar de forma segura múltiples drones autónomos. Además, ofrece acceso en tiempo real a datos de telemetría, video o carga útil simultáneamente desde uno o varios vehículos no tripulados. La transmisión de datos en vivo desde múltiples fuentes a una plataforma central mejora el conocimiento de la situación en tiempo real, lo que permite decisiones más informadas y tiempos de respuesta más rápidos.
- Aterrizaje y despegue: deben de ser precisos, especialmente en condiciones no óptimas, como vientos fuertes y oleaje. Un cajón o base para aterrizaje puede proteger y cargar el dron cuando no esté en operación [39].



Figura 21. Cajón guarda drones [39].

Adicionalmente, otra de las cosas muy importantes a tener en cuenta en los proyectos *offshore* debido a la influencia del mar, son los altos niveles de corrosión que se producen, cosa que en *onshore*, no es tan remarcable. Hay empresas como Delf Dinamic y el Centro Tecnológico de Euskadi (CEIT) que han lanzado el proyecto, *WATEREYE Project* [40] en el que se pretende realizar una monitorización inteligente de la corrosión producida en las torres de los aerogeneradores *offshore*, mediante un sistema basado en ultrasonidos, donde se despliegan unos nodos de sensores fijos que miden el espesor de la estructura y otros nodos móviles mediante el uso de drones. Se pretende hacer un seguimiento continuo de la pérdida de espesor de las estructuras de acero debido a la corrosión.

Otro tema importante que no hay que olvidar, es las regulaciones de seguridad para el uso del espacio aéreo, que rodean a las operaciones de drones, las cuales están todavía empezando y cada país tiene una regulación diferente y en constante cambio en relación a normativa y procesos de aprobación.

Sin embargo y a pesar de todas estas dificultades, hay que tener en cuenta que los costes de O&M de un parque eólico *offshore*, como ya se ha comentado, pueden ser del 30 % del coste total de la energía, lo cual es una cantidad a tener en cuenta a la hora de pensar en posibles alternativas que puedan reducir estos costes.

La investigación está en curso para desarrollar sistemas de drones o sistemas robóticos más avanzados que puedan operar de manera autónoma y colaborar entre sí. Los futuros sistemas que se plantean pueden incluir enjambres de UAV para inspecciones coordinadas, robots híbridos que puedan transitar entre entornos aéreos y submarinos, y sistemas de diagnóstico y reparación impulsados por inteligencia artificial más sofisticados, entre otros. En los siguientes apartados, se muestran algunos de los drones y los avances comentados para trabajar en inspecciones en *offshore*.

3.1.1 DRONES CAUTIVOS

La imagen típica de un dron, es la de un modelo tipo multicóptero, es decir, un equipo con múltiples brazos y hélices en cada extremo. No obstante, está ganando relevancia el uso de los llamados drones cautivos (en inglés, *tethered drones*), que se anclan a una plataforma fija, ya sea en tierra o en una embarcación, mediante un cable. Este cable puede transmitir tanto electricidad como datos de control e información de los sensores.

A pesar de que el cable de anclaje podría parecer una limitación, en realidad ofrece ventajas significativas. En primer lugar, el dron cautivo puede recibir una alimentación eléctrica continua, eliminando la necesidad de baterías pesadas y, por ende, proporcionando una

mayor flexibilidad en el vuelo en comparación con los drones no cautivos. Aunque se suele incorporar una batería de respaldo para emergencias, el suministro de energía es esencialmente ilimitado, permitiendo al dron mantener el vuelo durante largos períodos, lo cual es crucial para inspecciones prolongadas en el entorno *offshore*.

Además, la transmisión de datos y señales de control a través del cable elimina la dependencia de la radiofrecuencia, reduciendo problemas de ciberseguridad y posibles fallos de comunicación. Este enfoque también contribuye a una mayor seguridad operativa.

Los drones cautivos son especialmente útiles en operaciones de inspección en el mar, ya que permiten realizar observaciones fijas a gran altura durante tiempos prolongados con un despliegue rápido y sencillo, lo cual es fundamental en el entorno *offshore* [41].

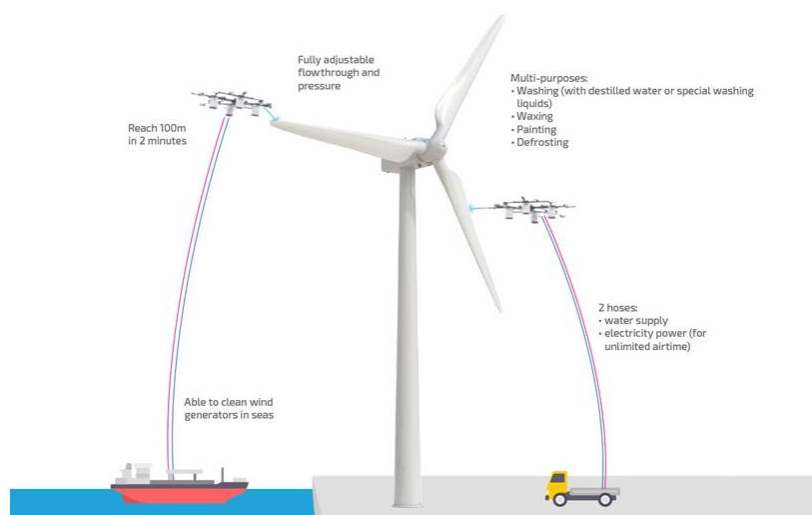


Figura 22. Drones Cautivos [41].

Sin embargo, hay que tener en cuenta que también existe algún inconveniente en relación a este sistema. El inconveniente principal, es el peso del cable que el dron debe elevar, lo cual limita su alcance operativo y su capacidad de carga útil. La elección del cable es crucial; un cable más grueso ofrece menor resistencia eléctrica, pero aumenta el peso que el dron debe soportar, mientras que un cable más fino, aunque reduce el peso, puede incrementar la resistencia eléctrica, resultando en una mayor disipación de potencia y posibles caídas de voltaje. Es esencial optimizar el diseño del cable para balancear estos factores.

Además de los drones cautivos, los drones multipropósito también tienen un gran potencial en el ámbito *offshore*. Estos modelos versátiles pueden llevar a cabo una amplia gama de tareas, aumentando aún más la eficacia en la supervisión y mantenimiento de instalaciones eólicas marinas.

3.1.2 DRONES MULTIPROPÓSITO

El diseño especializado de drones, con formatos y características específicas para tareas concretas, limita su versatilidad a aplicaciones particulares. Esto significa que, si un operador desea utilizar un dron para diferentes tareas, debe realizar una significativa inversión para adquirir nuevas aeronaves, además de afrontar costes adicionales relacionados con licencias, seguros y mantenimiento. Uno de los grandes retos actuales en esta tecnología es el desarrollo de drones multipropósito, capaces de realizar una amplia gama de tareas sin estar restringidos a un solo uso. Estos drones versátiles pueden ser equipados con distintos tipos de sensores y sistemas, permitiéndoles adaptarse a diversos entornos y aplicaciones.

En general, los drones comerciales suelen diseñarse con características específicas para campos de aplicación particulares, lo que limita su reutilización en otras áreas y aumenta los costes asociados en caso de modificaciones. La creación de drones multipropósito podría abordar estos problemas, ofreciendo a las empresas la flexibilidad de utilizar un solo equipo para diferentes tareas, lo que representa un beneficio claro.

Además, uno de los desafíos significativos para los vehículos aéreos no tripulados es la toma de decisiones en tiempo real. Es crucial implementar estrategias adecuadas que permitan gestionar la integridad del dron, cumplir con los requisitos legales y minimizar riesgos.

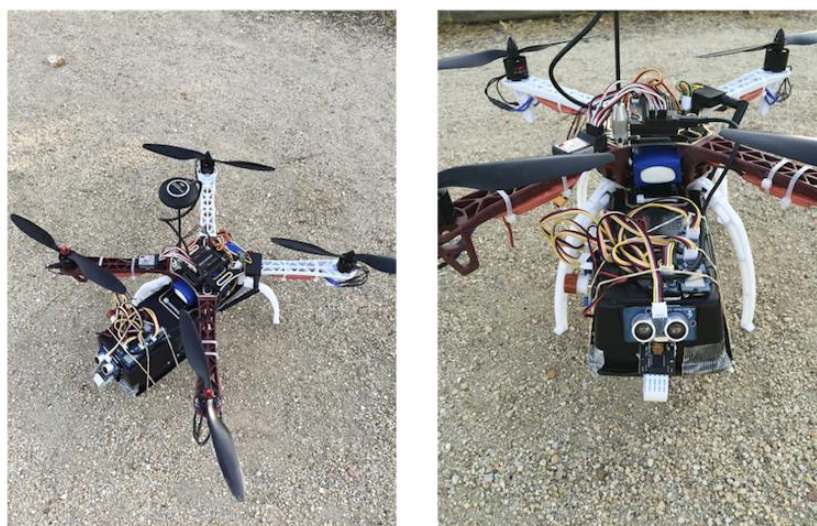


Figura 23. Dron equipado con un cerebro artificial [42].

Para enfrentar estos desafíos, ya se han desarrollado investigaciones que abordan la falta de drones multipropósito y las dificultades en la toma de decisiones autónomas y en tiempo real. Un ejemplo es la tesis titulada: “Una arquitectura orientada a servicios y dirigida por eventos para el control inteligente de UAV multipropósito” [42], que propone un dispositivo adaptable a cualquier dron. Esta solución ofrece una arquitectura de hardware abierta y flexible, diseñada

para facilitar la integración segura en el espacio aéreo y la coexistencia con otras aeronaves, cumpliendo con la normativa vigente. Además, permite monitorizar el entorno del dron, incluyendo variables como la batería, velocidad y dirección del viento, lluvia y obstáculos, ajustando el plan de vuelo en tiempo real para optimizar su eficiencia. Este enfoque es análogo a los vehículos autónomos, que ajustan su comportamiento según las señales de tráfico y condiciones de la ruta.

3.1.3 *DRONES HÍBRIDOS AIRE-AGUA*

Considerando el punto anterior, se han desarrollado ya modelos de drones capaces de volar en el aire y de maniobrar a través del agua, así como cambiar sin problema entre uno y otro medio. Se podría decir que se trata de un dron híbrido aéreo-acuático-submarino. Concretamente, la Universidad de Rutgers, desarrollo un dron llamado Naviator [43], que era justamente, una aeronave no tripulada capaz de volar en el aire y maniobrar a través del agua. Por aire, este dron es capaz de operar en ambientes hostiles donde hay nieve o lluvia. En el agua, tiene una flotabilidad neutra que le permite lograr una gran eficiencia energética, alcance y resistencia. Este dron puede inspeccionar y mantenerse en una posición concreta.

Sin embargo, el Naviator enfrenta desafíos como la necesidad de mejorar la independencia de la señal de radio tanto dentro como fuera del agua y de aumentar su potencia para transportar sensores adicionales. A pesar de estas limitaciones, las investigaciones en este ámbito están demostrando que es posible simplificar operaciones, ahorrar tiempo y descubrir nuevas capacidades, como la transición fluida entre medios, lo cual es crucial para futuras operaciones navales.

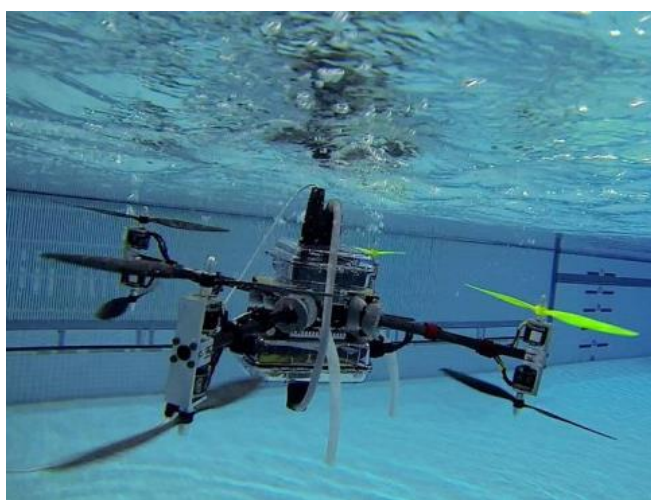


Figura 24. El Naviator [43].

Los drones acuáticos emplean tecnología similar a la de los drones aéreos, incluyendo software, sistemas de control, sensores anticolidión y GPS. Mientras que los drones aéreos

utilizan hélices para su propulsión, los drones acuáticos se mueven mediante rotores y están equipados con sensores específicos para medir profundidad, temperatura y otras variables del medio acuático. Un aspecto fundamental es la impermeabilidad total para proteger los componentes electrónicos del agua, y en algunos casos, la capacidad de soportar altas presiones al descender a mayores profundidades.

Los avances técnicos en drones acuáticos han progresado más lentamente que en los drones terrestres y aéreos. En España, por ejemplo, los drones acuáticos se rigen por la Ley de Navegación Marítima [44] debido a la falta de una normativa específica. No obstante, la variedad de tecnologías que estos drones empiezan a utilizar es cada vez más amplia, demostrando su eficacia en aplicaciones prácticas, como se explorará en el siguiente punto.

3.1.4 *DRONES SUBMARINOS*

Como se ha mencionado al comienzo de esta sección 3.1, los drones submarinos, son también conocidos como AUV y ROV [36]. Estos drones son esenciales para garantizar la integridad y el buen funcionamiento de componentes críticos como líneas de amarre, anclajes y cables submarinos en infraestructuras *offshore*.

Estos drones en muchos casos son equipados con cámaras de alta resolución, luces LED para darle más nitidez a las imágenes, sensores y herramientas de manipulación entre otros, para poder realizar inspecciones detallada de las estructuras submarinas, identificando daños, corrosión o desgastes. Además, algunos modelos avanzados de estos drones, pueden llevar a cabo reparaciones menores, aplicando recubrimientos protectores o ajustando componentes sueltos, lo que reduce la necesidad de intervenciones humanas costosas y arriesgadas.

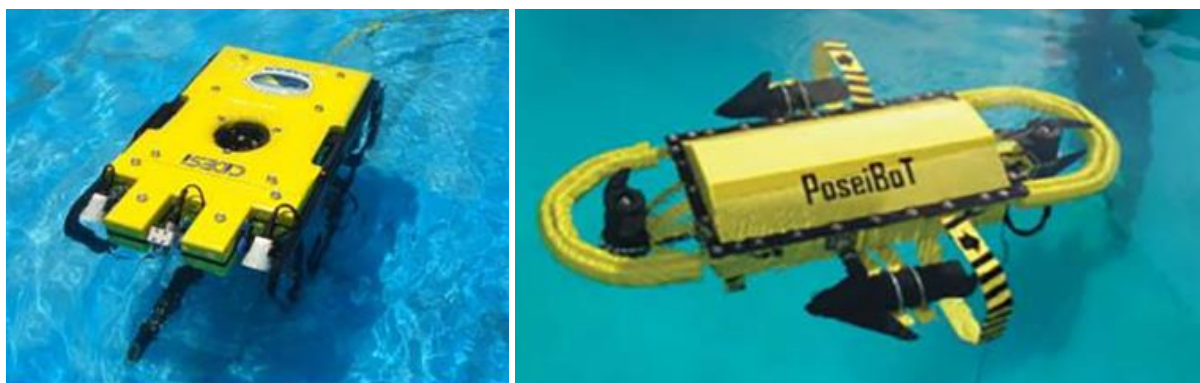


Figura 25. Drones submarinos ROV.

Estos drones, son también fundamentales para monitorizar el lecho marino y detectar cualquier signo de erosión o movimientos del sedimento que puedan comprometer la

estabilidad de los anclajes y otras estructuras. Esto es particularmente importante en áreas con corrientes fuertes o actividades sísmicas, donde el monitoreo constante es esencial para la seguridad y la longevidad del parque eólico.

El igual que en el apartado 3.1.3 se hablaba de la hibridación entre ambiente aéreo y submarino, aquí se puede hablar de la hibridación entre características de los AUV y los ROV. Estos sistemas ofrecen mayor versatilidad, pudiendo operar de manera autónoma para realizar inspecciones rutinarias y, cuando es necesario, ser controlados remotamente para realizar tareas más complejas y precisas. Esta dualidad mejora la eficiencia operativa y permite una respuesta rápida a emergencias o problemas detectados durante las inspecciones.

3.1.5 *DRONES CON MOTORES HÍBRIDOS*

Como ya se ha mencionado, la autonomía de sus baterías, es una de las principales limitaciones en el uso de drones. Además de los drones cautivos, otra solución emergente es el desarrollo de drones con motores híbridos, como los que combinan, por ejemplo, un generador de combustión (gasolina) y una batería. Estos drones incorporan un depósito de combustible acoplado a la aeronave.

Las principales ventajas de los drones híbridos son una mayor autonomía y un mejor rendimiento. Estos drones pueden permanecer en el aire mucho más tiempo que aquellos que dependen exclusivamente de baterías y pueden cubrir mayores distancias en menos tiempo, lo que les permite llegar más rápido a su destino. Sin embargo, la incorporación de sistemas adicionales aumenta la complejidad y el ruido en comparación con los drones eléctricos. Un ejemplo de un dron con motor de combustión interna es el Skyfront [45], que se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Dron híbrido con motor de combustión [45].

Al poseer este motor de combustión, le permite admitir mayor carga. El funcionamiento del motor está totalmente automatizado, simplemente necesita recarga de combustible cuando

se le acaba y vuelve como un multirrotor normal. Los niveles de combustible para llevar un control de su autonomía son visibles en la estación de tierra.

No solo hay opciones en la cual se usan motores de combustión, también se está trabajando en prototipos que usan baterías eléctricas con pila de hidrógeno, evitando así problemas de contaminación. Un ejemplo de este otro tipo es el Drone H2 [46], que posee un sistema híbrido de energía, en el que se contempla unas celdas de hidrógeno (desarrolladas con la participación del CIEMAT) junto con un sistema de batería de Li-Po que aportan los picos de potencia requeridos en maniobras especiales, típicamente en el despegue.



Figura 27. Dron híbrido con celdas de hidrógeno [46].

Alguno de los puntos en los que se están centrando estas tecnologías, son los sistemas de propulsión. Por un lado, los que usan un sistema de explosión con gasolina son más idóneos en drones de gran tamaño y para vuelos de más de 30 minutos. Mientras que los que usan motores eléctricos con baterías suelen ser para drones más pequeños con vuelos más cortos. Y en cuanto a los de pila de H₂, fuera de España ya hay varios modelos que se están comercializando sobre todo para usos civiles y militares. A pesar de que el precio de estos últimos es todavía bastante elevado en comparación con los de motor de combustión, son propulsores mucho más silenciosos.

3.1.6 DRONES TREPADORES

Los drones trepadores o *climbing robot* son muy empleados en tareas de inspección y mantenimiento de aerogeneradores, tanto en *onshore* como en *offshore*, ya que pueden escalar las torres y palas de los aerogeneradores, realizando inspecciones visuales, tareas de limpieza, inspección de defectos estructurales y reparaciones menores, reemplazando de esta forma a los operadores que tienen que acceder mediante cuerdas. Estos drones pueden moverse verticalmente o alrededor de la torre y las palas, permitiendo realizar una variedad de tareas de O&M. Atendiendo a su movilidad son clasificados como:

- Locomoción con patas: estos drones o robots son altamente adaptables a diversas estructuras superficiales y pueden sortear obstáculos y escalones. Sin embargo, su estructura mecánica compleja y sus sistemas de control aumentan su peso y los requisitos de par. Las configuraciones comunes suelen incluir drones con dos o cuatro patas.
- Locomoción con ruedas o cadenas: estos drones o robots se utilizan en superficies relativamente lisas y ofrece un movimiento rápido y continuo con estructuras mecánicas y diseños de control más simples. Están limitados en su capacidad para gestionar grandes escalones u obstáculos, lo que los hace menos adaptables a diversas características superficiales.

A pesar de los avances realizados en este tipo de drones, todavía se enfrentan a desafíos para lograr una estructura más ligera y una alta maniobrabilidad, lo que limita en cierto modo su aplicabilidad universal.

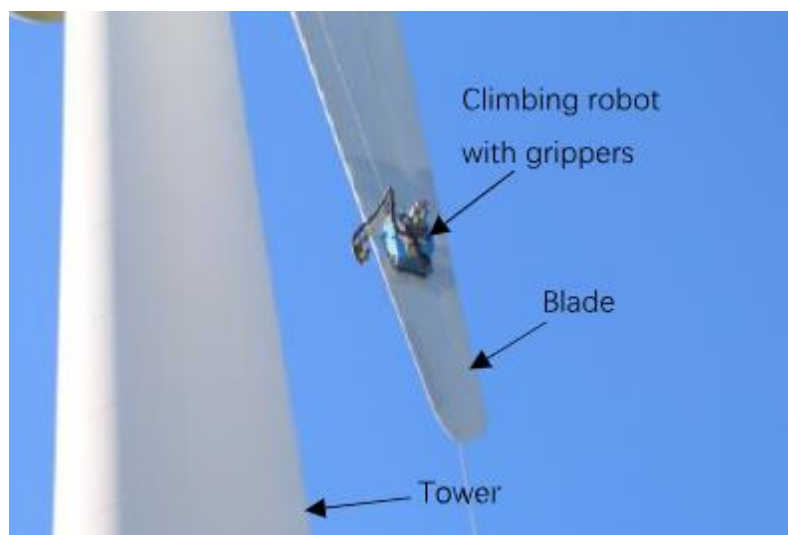


Figura 28. Drones trepadores.

3.1.7 **DRONES AUTONOMOS RESIDENTES**

Los drones autónomos residentes están diseñados para residir permanentemente en el lugar de operación, eliminando la necesidad de despliegue manual desde la costa o desde un barco. A través de estaciones base ubicadas en plataformas *offshore* o en los propios aerogeneradores, los drones residentes pueden realizar inspecciones programadas o bajo demanda, así como tareas de monitoreo continuo. Esto les garantiza un ciclo operativo continuo sin la intervención frecuente de operarios para recargarlos o desplegarlos. Pueden estar equipados con cámaras térmicas, ultrasonidos, LIDAR, y otros sensores, permitiendo la detección de defectos estructurales, acumulación de hielo, corrosión y otros problemas

potenciales en los aerogeneradores *offshore*. Gracias a la posibilidad de actuar en tiempo real, pueden detectar fallos y enviar alertas inmediatas, lo que permite una respuesta rápida ante problemas críticos. Estos drones deben ser altamente robustos para operar de manera eficiente en ambientes desafiantes. Al eliminar la necesidad de despliegue manual desde barcos o helicópteros, los drones residentes reducen significativamente los costos operativos y minimizan los riesgos humanos asociados con las inspecciones manuales. Este modelo de operación autónoma e in-situ mejora la eficiencia del mantenimiento preventivo, extendiendo la vida útil de las infraestructuras *offshore* y reduciendo los tiempos de inactividad de los aerogeneradores.

La clave del éxito de estos drones reside en la integración de sensores inteligentes, sistemas de control avanzados y capacidades de procesamiento en tiempo real. Estos componentes proporcionan una comprensión situacional precisa, permitiendo a los robots ejecutar tareas complejas de manera autónoma, con retroalimentación continua hacia los operadores humanos. Además, la implementación de modelos de autonomía compartida fomenta la cooperación fluida entre robots y personas, optimizando tanto la seguridad como la eficiencia en operaciones críticas.

Lilypad, es un innovador sistema de inspección *offshore* que utiliza vehículos aéreos no tripulados (UAV) autónomos residentes [47]. Este ecosistema de UAV, operando más allá de la línea de visión (BVLOS) y equipado con inteligencia artificial y sensores avanzados, está diseñado para revolucionar la forma en que los operadores de parques eólicos marinos monitorean y mantienen sus instalaciones. Este enfoque de inspección autónoma no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a extender la vida útil de los aerogeneradores y a maximizar su tiempo de funcionamiento.



Figura 29. Dron autónomo residente [47].

3.2 ASPECTOS LEGALES EN LOS VUELOS DE DRONES

El organismo encargado de regular el uso de drones en España es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) [48]. Con respecto a la Normativa de drones en España, actualmente, han comenzado a aplicarse los Reglamentos Europeos RE 2019/947 [49] y a partir del 1 de enero de 2024 ha entrado en vigor el mercado de clase de UAS y los requisitos para diseño, fabricación y comercialización de UAS y accesorias, así como las normas para operadores de terceros países del RD 2019/945 [50] de la Unión Europea.

3.2.1 LICENCIAS PARA PODER VOLAR DRONES

A la hora de volar un dron, no existe distinción si se trata de vuelos recreativos (ocio) o vuelos profesionales (trabajo). Para drones a partir de 250 gramos, es obligatorio obtener un certificado que acredite un mínimo de conocimientos, estableciendo el vuelo del dron en las diferentes categorías explicadas a continuación.

Por un lado, está la categoría abierta. Para volar drones en esta categoría de la nueva Normativa UAS, es obligatorio superar el correspondiente examen en AESA, que puede ser de Nivel 1 o Nivel 2, dependiendo del riesgo de la operación. Por otro lado, está la categoría específica. En este caso, es necesario superar el examen de AESA de Nivel 3, que contempla otros escenarios.

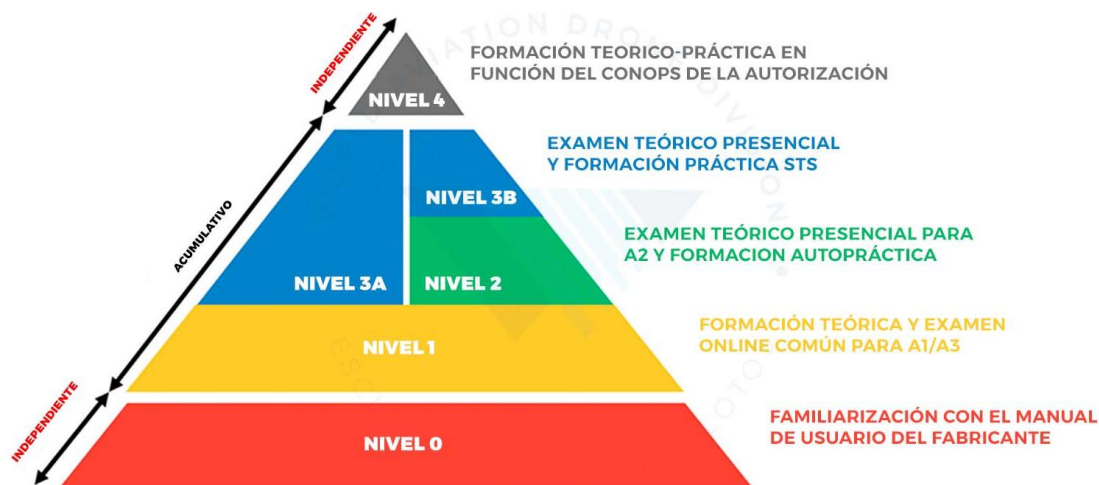


Figura 30. Niveles de formación para Pilotos de Drones (48).

Además, independientemente de la categoría en la que se vaya a operar, hay una serie de directrices que se deben tener en cuenta para volar tu dron legalmente y que vienen explicadas en el apartado a continuación.

3.2.2 LIMITACIONES GENERALES PARA VUELOS DE DRONES

A partir de agosto de 2024, pasan a existir solo los escenarios europeos (extinción de los escenarios operacionales estándar en España) y se implementa, el marcado de clase y los nuevos requisitos para operar en Categoría Específica. Dentro de las limitaciones generales para el vuelo de drones, se encuentran:

- El dron, siempre al alcance visual del piloto (excepto en categoría específica bajo STS BVLOS).
- Nunca sobrepasar los 120 m de altura en vuelo.
- No volar en un mínimo de 8 km de cualquier aeropuerto, aeródromo o espacio aéreo controlado.
- Es obligatorio el seguro de responsabilidad civil y se debe contar con una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que se puedan ocasionar y a causa de un vuelo, ya sea recreativo o profesional.
- El dron deberá llevar una placa identificativa ignífuga fijada en la estructura que contendrá datos como el nombre del fabricante, el modelo, número de serie (si corresponde) y los datos de contacto del piloto.
- Proteger el derecho a la intimidad de los individuos que pudieran aparecer en las imágenes captadas por el dron, y tener especial cuidado con su divulgación pública para no vulnerar la Ley de Protección de Datos.

3.2.3 NUEVAS CATEGORIAS OPERACIONALES EN LA NORMATIVA DE AESA

Dependiendo del riesgo de la operación de vuelo, se contemplan tres categorías operacionales englobadas en la normativa de drones, según lo descrito por AESA:

1. Categoría abierta: para vuelos de bajo riesgo sin necesidad de autorización.
2. Categoría específica: para vuelos de riesgo medio en escenarios estándar sin declaración, o con autorización si no está dentro de dichos escenarios estándar.
3. Categoría certificada: para operaciones de riesgo alto requiriendo un régimen regulatorio similar al de la aviación tripulada.

3.2.3.1 **CATEGORIA ABIERTA (NIVEL 0, 1, 2)**

Aunque la categoría abierta se desglosa en tres subcategorías con diferentes requisitos de formación y condiciones operativas específicas (Figura 31), es importante tener en cuenta una serie de restricciones de vuelo comunes a todas ellas:

- Es imperativo mantener el dron siempre dentro del alcance visual (VLOS), a menos que se esté utilizando el modo *follow me* o se cuente con un observador, en cuyo caso se permite el uso de dispositivos de visión en primera persona (FPV).
- La altitud máxima permitida es de 120 metros desde la superficie.
- En caso de encontrarse con una aeronave tripulada, se debe reducir la altitud, llevar a cabo maniobras evasivas para evitar una posible colisión y aterrizar el dron lo antes posible.
- No se permite el sobrevuelo de grupos de personas.
- Queda estrictamente prohibido transportar mercancías peligrosas.

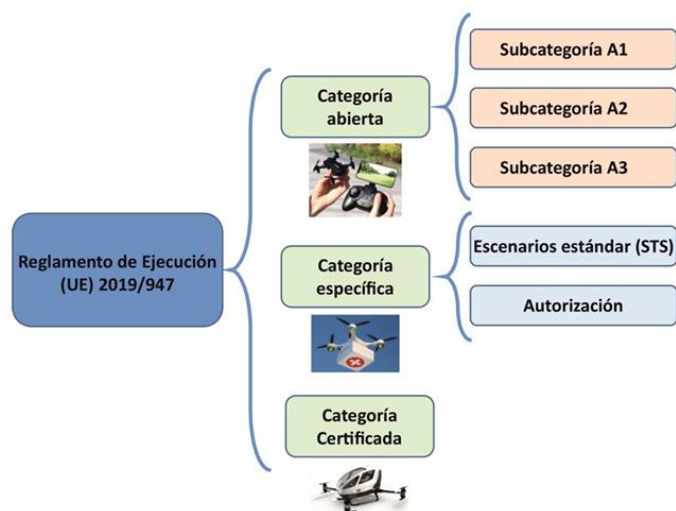


Figura 31. Categorías de UAS.

3.2.3.2 **CATEGORIA ESPECÍFICA (NIVEL 3A, 3B)**

Las operaciones comprendidas en la categoría específica de la nueva normativa son aquellas que no cumplen con los requisitos ni de la categoría abierta ni de la certificada (Figura 31).

Las operaciones en la Categoría Específica (escenarios operacionales estándar) en todo el territorio europeo adquieren cambios significativos a partir de agosto de 2024, momento en el que los escenarios españoles (STS-ES) dejarán de estar vigentes.

Es esencial tener en cuenta que esta categoría abarca operaciones con riesgo medio que no son viables en la categoría abierta.

Para poder operar en esta Categoría Específica, se necesita ser un operador registrado en España y solicitar y obtener una autorización operacional de AESA, o presentar una declaración para una operación que se ajuste al escenario estándar.

En los espacios estándares europeos, hay dos clases de UAS ambas con un MTOM (Máximo Peso al Despegue) superior a 25 kilos:

- Clase C5, que permite operaciones en STS-01 con vuelos donde el dron permanezca a la vista del piloto, y en una zona terrestre controlada en un entorno poblado.
- Clase C6, que autoriza operaciones en STS-02 con vuelos donde la aeronave puede estar fuera de la vista del piloto, y sobre una zona controlada escasamente poblada.

En relación con los escenarios estándar europeos, se ha producido una circunstancia excepcional. Hasta el 30 de agosto de 2024, los operadores de drones podrán seguir presentando declaraciones de conformidad con los STS-ES. Sin embargo, desde el 1 de enero de 2024 ya es posible presentar una declaración operacional basada en los escenarios europeos STS-01 y STS-02.

Los vuelos en parques eólicos marinos generalmente se clasifican dentro de esta categoría, la categoría específica, debido a los riesgos asociados:

- Operaciones sobre el mar.
- Posibles vuelos más allá de la línea de visión visual (BVLOS).
- Proximidad a estructuras críticas.

Además, en estos casos, se deben considerar también las regulaciones marítimas adicionales y posibles zonas restringidas.

3.2.3.3 CATEGORIA CERTIFICADAS (NIVEL 4)

Para que una operación de vuelo sea clasificada en la categoría certificada según la nueva normativa, debe involucrar alguna circunstancia de alto riesgo, como las siguientes:

- Vuelos sobre concentraciones de personas utilizando drones de dimensiones superiores a 3 metros.
- Transporte de personas mediante drones.

- Transporte de mercancías peligrosas.

Además, todas las operaciones que, de acuerdo con el estudio de seguridad correspondiente, presenten riesgos que no se puedan mitigar sin la certificación del dron, del operador o sin la necesidad de una licencia de piloto también caen dentro de esta categoría.

Se debe tener en cuenta que cada país tiene una legislación diferente en materia de seguridad aérea, por lo que esta debe ser consultada en los organismos competentes.

3.2.4 NUEVO MARCO LEGISLATIVO U-SPACE

El notable avance en el campo de las aeronaves no tripuladas (UAS), está destinado a transformar el panorama del transporte aéreo en los próximos años. En Europa, se ha dedicado esfuerzo en los últimos años al desarrollo de un sistema y su marco normativo correspondiente, con el objetivo de gestionar de manera automatizada e integrada el tráfico de numerosos UAS junto con la aviación tripulada.

El concepto conocido como *U-space* abarca una serie de sistemas, servicios y procedimientos diseñados para facilitar un acceso seguro y eficiente al espacio aéreo, permitiendo la realización de numerosas operaciones de drones de manera coordinada. La implementación del *U-space* se centra en el desarrollo de los elementos necesarios para la operación de drones en los espacios aéreos designados como *U-space*, cumpliendo con criterios rigurosos de seguridad, protección, privacidad y sostenibilidad ambiental. Este enfoque busca establecer un marco integral que garantice la integración efectiva de las aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo europeo, considerando diversos aspectos cruciales para su funcionamiento seguro, eficiente y coordinado en toda Europa.

La implementación del *U-space* se está llevando a cabo de manera gradual y requiere una coordinación efectiva entre numerosos actores, tanto en el ámbito público como en el privado. El Plan de Acción Nacional para el Despliegue del *U-space* 2022-2025 (PANDU) [51] tiene como objetivo impulsar el desarrollo del *U-space* en España, promoviendo un diseño efectivo y el adecuado avance de los proyectos. Este impulso proviene de iniciativas de diversas entidades, incluyendo las administraciones a nivel central, autonómico y local, centros tecnológicos, universidades, proveedores de servicios y operadores. La colaboración entre estos actores desempeña un papel fundamental en la implementación exitosa del *U-space*, asegurando una transición ordenada y eficiente hacia un sistema de gestión de tráfico aéreo que integre de manera segura las operaciones de drones en el espacio aéreo.

El marco regulatorio de *U-space* se basa principalmente en el Reglamento UE 2021/664 [52], que establece normas y procedimientos para la seguridad de las operaciones de UAS en el

espacio aéreo *U-space*. Además, incluye dos reglamentos de ejecución (Reglamento UE 2021/665 [53] y Reglamento UE 221/666 [54]) que definen los requisitos para los Proveedores de Servicios de Navegación Aérea (ANSP) y la aviación tripulada, así como cambios en el SERA. Este conjunto normativo, vigente desde el 26 de enero de 2023, permite a los Estados Miembros desplegar *U-space* y promover la movilidad aérea urbana en Europa. Sin embargo, esta normativa, no se aplica de manera directa a los vuelos sobre parques eólicos *offshore* en la actualidad. Esto se debe a que estas áreas marítimas no han sido designadas como espacio aéreo *U-space* por los Estados miembros. Quizás en un futuro, las operaciones de drones en parques eólicos cercanos a la costa podrían verse afectadas si estas áreas fueran incluidas en futuras designaciones *U-space*, lo que requeriría a los operadores adaptarse a las nuevas regulaciones.

En definitiva, las operaciones en parques eólicos *offshore*, se podría decir que siguen estando bajo la jurisdicción del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 [49], los POEM aprobados en 2023 que incluyen una superficie correspondiente a Zonas de Alto Potencia para la renovables (ZAPER) con un área de 5.000 km², las normativas nacionales específicas para operaciones marítimas y las regulaciones de seguridad marítima. Y como ya se ha comentado en el punto 3.2.3.2, dado el entorno desafiante y los riesgos asociados con estas actividades, las operaciones suelen clasificarse en la Categoría Específica, lo que requiere una autorización especial de la autoridad competente. Esto asegura que las inspecciones y mantenimientos en parques eólicos en alta mar se realicen de manera segura y eficiente, sin comprometer las operaciones marítimas.

A medida que la normativa *U-space* continúe evolucionando y expandiéndose, es posible que se incluyan zonas marítimas cercanas a la costa dentro del espacio aéreo *U-space*, afectando indirectamente a ciertos parques eólicos *offshore*. Los servicios asociados con *U-space*, como la identificación de red y la geo-consciencia, podrían ofrecer beneficios adicionales en términos de seguridad, permitiendo una mayor integración y supervisión de las operaciones de drones en estas áreas sensibles. La evolución de *U-space* debe ser monitoreada de cerca por las empresas que operan en el sector de la energía eólica *offshore*, que por el momento dependen de los POEM. El panorama regulatorio podría cambiar en el futuro, lo que exige un seguimiento activo por parte de los operadores para anticipar cualquier modificación que pueda afectar la eficiencia y seguridad de sus operaciones.

3.2.5 IMPACTO Y ACEPTACIÓN SOCIAL DE LOS DRONES

El rápido avance de la tecnología de drones ha planteado una serie de preguntas sobre su impacto y aceptación social [55], tanto en términos de sus beneficios como de sus posibles

inconvenientes. A pesar de los beneficios claros y demostrables que está teniendo esta tecnología en diferentes áreas, existen preocupaciones que deben ser abordadas.

Por poner algunos ejemplos en diferentes áreas, en situaciones de seguridad y emergencias, los drones han demostrado ser particularmente valiosos. En desastres naturales, por ejemplo, los drones pueden proporcionar una visión aérea en tiempo real, facilitando las operaciones de rescate y evaluación de daños. Permiten una vigilancia continua y discreta, mejorando la eficiencia de las respuestas ante emergencias. En el contexto de operación y mantenimiento (O&M) de parques eólicos *offshore*, que es el tema principal de este documento, los drones están demostrando ser especialmente útiles. Las condiciones adversas y desafiantes del entorno marino hacen que las inspecciones manuales sean peligrosas y costosas. Los drones pueden realizar inspecciones rápidas y detalladas de las turbinas eólicas, identificando problemas como la corrosión, daños en las palas y fallos estructurales sin necesidad de intervención humana directa. Esta capacidad reduce significativamente el tiempo de inactividad de los aerogeneradores y mejora la eficiencia operativa de los parques eólicos marinos.

Sin embargo, la aceptación social de los drones no está exenta de desafíos. Existen preocupaciones sobre el impacto ambiental de los drones, así como sobre la privacidad y el uso indebido de estas tecnologías. Por lo tanto, es crucial establecer regulaciones claras y transparentes que aborden estas preocupaciones y fomenten la confianza pública en el uso de drones.

En el caso de parques eólico marinos, el problema de la privacidad se minimiza ya que las instalaciones están alejadas de la costa, por lo que no suponen una invasión de la misma para los individuos. Aun así, es crucial tener en cuenta que la adquisición y manejo de datos obtenidos por los drones, en términos de seguridad debe ser también una prioridad a tener en cuenta para evitar cualquier uso indebido o acceso no autorizado. Otro aspecto positivo en este campo, es la reducción del impacto ambiental comparado con los métodos tradicionales de inspección y mantenimiento. Los drones, al minimizar la necesidad de enviar barcos y personal al sitio, disminuyen las emisiones de carbono y la perturbación de la vida marina, contribuyendo a la sostenibilidad de los parques eólicos *offshore*. Esta ventaja ambiental fortalece el argumento a favor de la adopción de drones en la industria eólica marina.

Además de estos beneficios, los drones también tienen el potencial de crear nuevas oportunidades laborales y de desarrollo tecnológico. La creciente demanda de operadores de drones cualificados y de profesionales especializados en el análisis de datos recogidos por drones podría impulsar la formación y el empleo en estos campos.

4 NUEVAS TECNOLOGÍAS INCORPORADAS A DRONES

El uso de la AI está revolucionando muchas industrias. La convergencia de este campo con la tecnología de los drones está llevando a explorar nuevas aplicaciones que van desde temas de operación, control, hasta la propia automatización. Aquí entran en juego conceptos como el aprendizaje automático, la visión por ordenador y la toma de decisiones autónoma.

A continuación, se presentan algunos de los proyectos llevados a cabo hasta la fecha, que demuestran, cómo el uso de la AI junto con otras tecnologías avanzadas, ha fortalecido la capacidad de los drones para enfrentar desafíos específicos en diferentes entornos. Los avances emergentes sacados de estos proyectos y las posibles tendencias en la investigación y desarrollo pueden contribuir también a la mejora y optimización de los proyectos *offshore*, ya que la utilización de todos estos avances tecnológicos mejora de forma considerable la capacidad de operación de los vehículos aéreos no tripulados.

Algunos de estos proyectos relacionados con drones, han sido sacados de la red CORDIS (*Community Research and Development Information Service*) de la Unión Europea [56]. CORDIS es una plataforma que proporciona información sobre proyectos de investigación y desarrollo financiados por la Unión Europea en diversas áreas, como ciencia, tecnología, innovación y desarrollo sostenible. Esta red, actúa como un punto central para la difusión de resultados de proyectos y la promoción de la colaboración en el ámbito de la investigación y la innovación en la Unión Europea.

4.1 LOS DRONES AUTÓNOMOS Y AUTORRECARGABLES

Actualmente, las inspecciones de grandes obras civiles, dependen de personas que realizan su trabajo a pie o en helicóptero. Esto presenta limitaciones en términos de seguridad, costes, tiempo y precisión.

Impulsado por AI, el sistema Drones4Safety [57] incluye capacidades de vuelo autónomo, auto-carga, la capacidad de operar en enjambres⁴ y la detección de fallas. Los principales desafíos del proyecto se abordaron con tecnologías avanzadas de ondas milimétricas para mejorar las capacidades de detección, sistemas multiprocesador en chips para tareas de procesamiento intensivo y el diseño de una robusta jaula de Faraday para proteger los drones de las interferencias electromagnéticas.

⁴ Operar en enjambre para drones se refiere a la coordinación de múltiples drones que actúan de manera sincronizada y autónoma, colaborando para completar tareas complejas.

Los drones no sólo son capaces de volar de forma autónoma, sino también de recargarse automáticamente mediante cables ferroviarios y eléctricos. Cuando el nivel de batería de un dron es bajo, navega de forma autónoma hasta la línea aérea más cercana. Esta navegación está guiada por software de AI basado en la nube y señales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y el Sistema Europeo de Navegación Geoestacionaria Superpuesta (EGNOS). Los investigadores necesitaban diseñar un método para que los vehículos se conectaran a dicha fuente de energía. Los socios del proyecto Fraunhofer y NEAT desarrollaron dos mecanismos para recargar desde líneas de CA y CC. El recolector de CA funciona según el concepto de inducción, aprovechando el campo magnético oscilante de las líneas eléctricas. El recolector de CC, que se adapta bien al sistema ferroviario, convierte el nivel de voltaje de la línea de CC al nivel de voltaje del dron mediante métodos de conmutación rápida y disipación de calor.

Uno de los objetivos de este proyecto era delegar tareas entre múltiples drones, mejorando la eficiencia de la inspección a través de una configuración común de sincronización e intercambio de información. Drones4Safety ha conseguido desarrollar con éxito algoritmos de enjambre centrados en la planificación de rutas y el vuelo en formación, que también incluye el evitar obstáculos y colisiones, así como la protección contra amenazas de ciberseguridad.

La AI juega un papel importante en el proyecto donde las imágenes capturadas por los drones se transmiten a un servidor en la nube y algoritmos entrenados detectan cualquier defecto de infraestructura durante la inspección.

La recarga automática de los drones en entornos terrestres podría inspirar soluciones innovadoras para entornos *offshore*, donde las fuentes de energía tradicionales son limitadas. En estos casos, se podrían considerar estaciones de recarga flotantes o paneles solares en plataformas marítimas. Igualmente, la planificación de rutas de vuelo en estos entornos garantiza la seguridad de las operaciones a largas distancias.

4.2 LOS PLANES DE VUELO CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Este proyecto, llamado FlightAI [58] se centró en mejorar la seguridad y eficiencia de los drones mediante la integración de AI en la elaboración de planes de vuelo. El equipo de FlightAI propuso integrar la tecnología AI en un servicio web existente, llamado SAMWISE, para realizar evaluaciones de riesgos de operaciones específicas (SORA)⁵ para drones.

⁵ SORA es un marco de evaluación de riesgos utilizado en operaciones de drones, diseñado para garantizar la seguridad en vuelos específicos. Evalúa factores como el entorno, las capacidades del dron y las medidas de mitigación para minimizar riesgos aéreos y terrestres.

Los objetivos principales de este proyecto eran: formular planes de vuelo mediante el uso de la inteligencia artificial basados en una interfaz interactiva, resolver problemas complejos al encontrar soluciones en espacios de búsqueda muy poco lineales utilizando la tecnología AI, integrar la AI en el servicio web de SAMWISE para realizar las evaluaciones de riesgos y analizar la tecnología de AI generada, objetivo que se desarrolló dentro del proyecto GOAL-robots (*Goal-based Open-ended Autonomous Learning Robots*), iniciativa en la que se buscaba desarrollar un nuevo paradigma para construir robots con capacidades de aprendizaje abierto, permitiendo a los robots generar sus propios objetivos utilizando algoritmos de aprendizaje avanzados para acelerar la adquisición de nuevas habilidades.

La integración de AI en la planificación de vuelos también ofrece beneficios significativos para la investigación y operaciones *offshore*, donde las condiciones pueden ser más impredecibles y desafiantes. La capacidad de la AI para evaluar riesgos y formular planes de vuelo optimizados puede mejorar la seguridad y eficiencia de los drones en estos entornos remotos, facilitando tareas como la inspección de infraestructuras marinas. Además, el aprendizaje autónomo avanzado, como ya se ha comentado, permite a los drones adaptarse rápidamente a nuevos desafíos y mejorar continuamente su desempeño en misiones *offshore*.

4.3 UN MARCO INNOVADOR PARA OPERACIONES CON DRONES

El equipo de investigación del proyecto COMP4DRONES [59], respaldado por fondos europeos, desempeña un papel esencial al proporcionar un marco de tecnologías habilitadoras clave con el potencial de transformar significativamente la industria de los drones. COMP4DRONES ofrece una plataforma integrada que incluye componentes reutilizables y cualificados, junto con un entorno de ingeniería ágil que facilita el desarrollo y la personalización de drones. Se destaca la visión de un futuro en el que los drones se integren de manera perfecta en el espacio aéreo europeo, llevando a cabo diversas tareas, como transporte, construcción, vigilancia, inspección y agricultura. La arquitectura de referencia desarrollada por el equipo de COMP4DRONES facilita la integración y personalización de sistemas de drones para hacer realidad esta visión.

Con el objetivo de garantizar la sostenibilidad a largo plazo, COMP4DRONES ha establecido la Red Europea de Tecnología de Drones (RODENT) [60], un ecosistema colaborativo y sostenible. Esta red actúa como un laboratorio virtual compartido que brinda acceso a conocimientos y experiencias, atrayendo talento de toda Europa.

Al facilitar la personalización y desarrollo ágil de drones, es posible crear soluciones específicas para los desafíos únicos del entorno marino, como la inspección de plataformas *offshore* y vigilancia de áreas protegidas. Además, la capacidad de reutilizar componentes

cualificados asegura que los drones puedan adaptarse rápidamente a nuevas aplicaciones *offshore*, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos operativos. Para la industria *offshore*, esta red brinda la posibilidad de aprovechar la experiencia acumulada en toda Europa para abordar desafíos específicos del sector marítimo y fomentar un desarrollo continuo de la tecnología y servicios de drones en toda Europa.

4.4 TAREAS DE MANTENIMIENTO COMPLEJAS

La generación de drones desarrollados dentro del marco del proyecto AEROARMS [61], presenta un avance significativo en la eficiencia y economía del mantenimiento en comparación con los métodos tradicionales. La idea trata de un dron equipado con brazos y un sistema AI que le otorga la capacidad de razonar lo suficiente como para llevar a cabo las tareas de mantenimiento más complejas, delicadas y de difícil acceso.

Además de poder volar hasta las estructuras más altas, tienen la capacidad también de cartografiar, calcular el grosor de las paredes de tuberías mediante sensores ultrasónicos, desplegar sensores de ensayos no destructivos, etc. En refinerías, se prevé unos ahorros en costes de inspección muy sustanciales.



Figura 32. Aeroarms [61].

La innovación de este proyecto AEROARMS (AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance) radica en la introducción de los primeros manipuladores robóticos aéreos inteligentes del mundo. La AI avanzada incorporada en estos drones permite la ejecución de tareas complejas, como sujetar un objeto con un brazo mientras se inspecciona con otro.

En el caso de inspecciones *offshore*, esta idea podría, con la ayuda de otros sensores como dispositivos ultrasónicos o cámaras de imágenes térmicas, detectar problemas estructurales como corrosión, grietas o fugas, acercándose mucho más a las estructuras e incluso con la opción de poder colocar sensores en las mismas, como podría ser el caso de acelerómetros u otros tipos de sensores.

Otro ejemplo de drones que realiza tareas de mantenimiento complejas, es el dron desarrollado por la empresa española DRONERPA [62] para la instalación de balizas anticolidión para la protección de la avifauna, en líneas eléctricas en servicio (sin interrumpir el suministro).

Se trata de un dron diseñado específicamente para volar muy cerca, e incluso tocar, las líneas de distribución que están en funcionamiento con tensión, como se muestra en la Figura 33. Este desarrollo permite realizar la instalación de dichas balizas, sin interrumpir el suministro eléctrico, lo cual es esencial en líneas donde la interrupción del servicio tiene severas consecuencias.



Figura 33. Dron para instalación de balizas avifauna en líneas de distribución eléctrica en servicio [62].

En el diseño, se cuidaron todas las posibles anomalías que pueden producir las líneas eléctricas en un dron, garantizando su funcionamiento seguro y eficiente en entornos de alta tensión. Se realizaron ensayos en líneas electrificadas de hasta 45 KV, y en ningún caso se apreció fallo, ni perturbación en la estabilidad del vuelo. El dron incorpora una carga de pago⁶ especialmente diseñada para la instalación precisa y segura de estas balizas, eliminando riesgos para los operarios humanos. Las únicas balizas homologadas en España por Red Eléctrica Española (R.E.E.) conllevan una dificultad en su instalación ya que su diseño implica

⁶ La carga de pago se refiere al equipo especializado que el dron transporta para realizar una tarea específica, en este caso, la instalación de balizas avifauna en líneas de distribución eléctrica. La carga de pago incluye el instalador de balizas, que se encarga de colocar las balizas en los cables de manera automática.

ejercer una gran fuerza. Este trabajo lo realiza el dron de forma automática una vez detecta el cable con un láser, siendo capaz de operar con vientos de hasta 12 m/s, colocando las balizas con precisión con una productividad de 50 balizas al día, ofreciendo una solución eficiente y rentable. Esta alta capacidad de producción permite realizar las tareas de manera rápida y efectiva, reduciendo los tiempos de intervención y optimizando los recursos disponibles. Además, permite la instalación de balizas en zonas con especial dificultad de acceso y con grandes inclinaciones del cable. El dron ha realizado más de 1000 vuelos sin registrar incidencia alguna, demostrando su fiabilidad y robustez, así como la dedicación y experiencia del equipo técnico, detrás de su desarrollo.

4.5 INSPECCIONES DE LAS PALAS DE AEROGENERADORES MEDIANTE DRONES

La inspección y el mantenimiento de las palas de los aerogeneradores es un proceso que permite a los operadores detectar de manera temprana posibles problemas y evitar paradas costosas del servicio. El proyecto Windrone Zenith [63] aborda esta necesidad, mediante un software especializado que capacita al dron para volar de manera segura y autónoma en las proximidades del aerogenerador. Durante las diferentes misiones, el dron recopila imágenes de alta resolución que permiten la identificación incluso de grietas diminutas en los álabes. La eficacia de este proceso se ve respaldada por la capacidad de análisis de datos que posteriormente son subidos en la nube de una plataforma y permite así obtener una imagen más nítida del ciclo de vida de las palas.

Con este proyecto se pretende reducir los costes asociados con las paradas no planificadas y mejorar la eficiencia operativa global. Este avance no solo representa una contribución esencial al campo de las energías renovables, sino que también destaca la importancia de la innovación tecnológica para superar desafíos críticos en una industria en constante evolución. Si se presta atención en la industria *offshore*, se podrían destacar múltiples ventajas entre las que se encuentran:

- Seguridad: el uso de este tipo de drones reduce significativamente el riesgo para los técnicos, eliminando la necesidad de que estos realicen trabajos en altura o en condiciones adversas.
- Eficiencia y reducción de costes: no solo reduce el tiempo de inactividad de los aerogeneradores como ya se ha comentado, sino que también disminuye los costes operativos y de mantenimiento, que representan una parte significativa del costo total de un aerogenerador durante toda su vida útil.

- Calidad de los datos: con el uso de sensores avanzados, estos drones tienen la capacidad de capturar imágenes de muy alta resolución y analizar estos datos con la ayuda de algoritmos de aprendizaje automático, puede mejorar la capacidad de detección de fallos y permitir un mantenimiento predictivo mucho más eficaz.
- Alcance global y sostenibilidad: la capacidad de optimizar el mantenimiento y la operación de los aerogeneradores *offshore* contribuye a la sostenibilidad del sector alargando como ya se ha comentado la vida útil de las palas y mejorando la eficiencia energética global.

4.6 MULTIRROTOR HÍBRIDO

La innovación del proyecto HYBRiX [64], ha marcado un avance en la autonomía de vuelo de los drones (ver también el apartado 3.1.5). Con este proyecto se ha llegado a alcanzar una autonomía de vuelo de diez horas, lo que representa una mejora notable en comparación con la limitada duración de vuelos de los drones eléctricos convencionales.



Figura 34. Dron del proyecto HIBRiX [64].

La innovación trata de un sistema de propulsión híbrido (eléctrico-combustible) para drones, adoptando un enfoque similar al utilizado en vehículos híbridos convencionales. En las primeras pruebas se llegó a una autonomía de tres horas, mientras los drones eléctricos solo llegaban a los 30 minutos.

Esta innovación podría tener gran cabida en la industria *offshore*, donde se deben realizar vuelos a larga distancia y de larga duración, pudiendo ofrecer soluciones eficaces para la inspección y el mantenimiento de aerogeneradores en ubicaciones remotas en alta mar. El dron podría desplazarse para realizar tareas de vigilancia, inspección de infraestructuras y

monitoreo ambiental, aprovechando su autonomía extendida y versatilidad operativa. A pesar de la sugerencia en muchos textos, de que los drones de ala fija son más adecuados para distancias largas debido a su capacidad para alcanzar mayores alturas, los drones híbridos, presentan una alternativa interesante.

A día de hoy, también se está trabajando en esta iniciativa de sistemas híbridos para drones usando como combustible el hidrógeno. (Ver punto 3.1.5).

4.7 ESTUDIAR LA CORROSIÓN MEDIANTE DRONES EN OFFSHORE

Este proyecto llamado WATEREYE [40], ya mencionado en la sección 3.1, aborda las limitaciones actuales en la eficiencia de la O&M de parques eólicos marinos. El énfasis de WATEREYE radica en la predicción de la tasa de degradación de las estructuras marítimas debido a procesos de corrosión, una problemática que ha demostrado ser la principal fuente de criticidad económica (en €/kWh) en la industria marina. Los fallos estructurales, en su mayoría derivados de la corrosión no anticipada ni monitoreada de manera adecuada, instan a la necesidad crucial de implementar herramientas avanzadas de monitoreo, diagnóstico, pronóstico y control en parques eólicos marinos. Estas herramientas permiten a los operadores de parques eólicos tomar decisiones predictivas e inteligentes relacionadas con la O&M, considerando plenamente el estado presente y futuro de los componentes estructurales.

El objetivo de este proyecto consiste en desarrollar una solución integral para predecir de manera precisa la necesidad de estrategias futuras de mantenimiento, aumentando la producción anual de energía eólica marina. Para ello, se ideó un sistema de monitoreo capaz de estimar remotamente el nivel de corrosión en ubicaciones específicas de aerogeneradores, como torre, zona de salpicaduras y la unión torre-plataforma. Esto se logró mediante la creación de sensores de corrosión por ultrasonidos ad-hoc no invasivos, de bajo coste, alta precisión y rápida respuesta. Se implementaron comunicaciones inalámbricas eficientes y robustas diseñadas para el entorno de comunicación desafiante de los aerogeneradores *offshore* en alta mar. Además, se desarrolló una innovadora plataforma móvil basada en drones para posicionar un sensor móvil dentro de la torre.

También se perfeccionaron modelos de predicción, mediante el análisis de datos adquiridos, utilizando enfoques novedosos, como modelos semánticos y se desarrollaron algoritmos de control para aerogeneradores y parques *offshore*, teniendo en cuenta de manera precisa la salud estructural. Los algoritmos creados con AI permitían un equilibrio óptimo entre producción de energía, control de protección y mantenimiento predictivo.

4.8 COMUNICACIÓN PARA LA LOGÍSTICA CON DRONES

Un pequeño helicóptero no tripulado llamado superARTIS [65] despegó de los parques eólicos que hay en la baja Sajonia, en Alemania, marcando un hito en la exploración de aplicaciones logísticas mediante drones. El objetivo era verificar la efectividad de la comunicación entre el dron y el parque eólico. Previamente conceptualizada y programada por expertos, la interfaz de comunicación diseñada permitió al dron recibir datos cruciales de velocidad, dirección, orientación del aerogenerador y velocidad del rotor. Posteriormente, el dron utilizó esta información para seleccionar de manera autónoma su ruta de vuelo. Se hicieron pruebas, donde el dron se aseguró que el rotor del aerogenerador objeto de estudio estuviese detenido antes de acercarse. Después, el dron se aproximó al aerogenerador desde el lado opuesto al viento hasta alcanzar una distancia predeterminada y supo esperar a la autorización necesaria para dejar la carga. En caso de no recibir dicha autorización, el dron hubiese entrado automáticamente en un patrón de espera, destacando la importancia de los protocolos de seguridad implementados.

Este proceso se puede extrapolar perfectamente a un parque eólico marino, estableciendo así un precedente para futuras implementaciones. El enfoque en la seguridad, eficiencia y viabilidad técnica subraya el potencial de los drones logísticos *offshore*, destacando su papel en la mejora de la operatividad y el mantenimiento de infraestructuras en entornos marinos.



Figura 35. SuperARTIS [65].

4.9 ESTUDIO DE LAS TURBULENCIAS MEDIANTE DRONES

El viento, cuando se estudia en profundidad, es más complejo de lo que parece. En muchos casos, tiene un carácter turbulento que se ve influenciado por el entorno circundante, incluyendo paisajes, edificaciones, carreteras y aerogeneradores. El proyecto ESTABLIS-UAS

(*Exposing Spatio-Temporal Structures of Turbulence in the Atmospheric Boundary Layer with In Situ Measurements by a Fleet of Unmanned Aerial Systems*) [66], estudia estos efectos de flujo, utilizando un enjambre de drones para elevarse y medir estos fenómenos con precisión. Los resultados obtenidos presentan aplicaciones potenciales para optimizar la disposición estratégica de turbinas eólicas en parques eólicos.

El estudio de las condiciones turbulentas es muy importante para poder anticipar las cargas a las que estarán expuestos los aerogeneradores a lo largo de su ciclo de vida y prever con precisión la cantidad de energía que se inyectará en la red eléctrica. El objetivo del proyecto es lanzar 100 drones en formación fija desde el suelo para realizar mediciones in situ de las características del viento, temperatura y humedad con una resolución excepcional. Se han realizado pruebas con una cantidad menor de drones mostrando su robustez y permitiendo mantener una posición fija a pasar de los altos vientos.



Figura 36. Establis-UAS [66].

4.10 ESTUDIO DE FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

Los estudios atmosféricos cada vez están cobrando más importancia a la hora de entender el cambio climático. Desde la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) [67] en colaboración con otras entidades, se lanzó un proyecto en busca de una imagen completa de las interacciones océano-atmósfera que desencadenan la formación de huracanes, aprovechando la tecnología de drones para recopilar datos meteorológicos y oceánicos cruciales. Los drones se lanzan con el objetivo de transmitir datos meteorológicos y oceánicos en tiempo casi real, abarcando aspectos como la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión barométrica, la velocidad y dirección del viento, la temperatura y salinidad del agua,

así como la temperatura de la superficie del mar, altura y periodo de las olas. Estos datos son enviados a varios laboratorios para su posterior estudio.

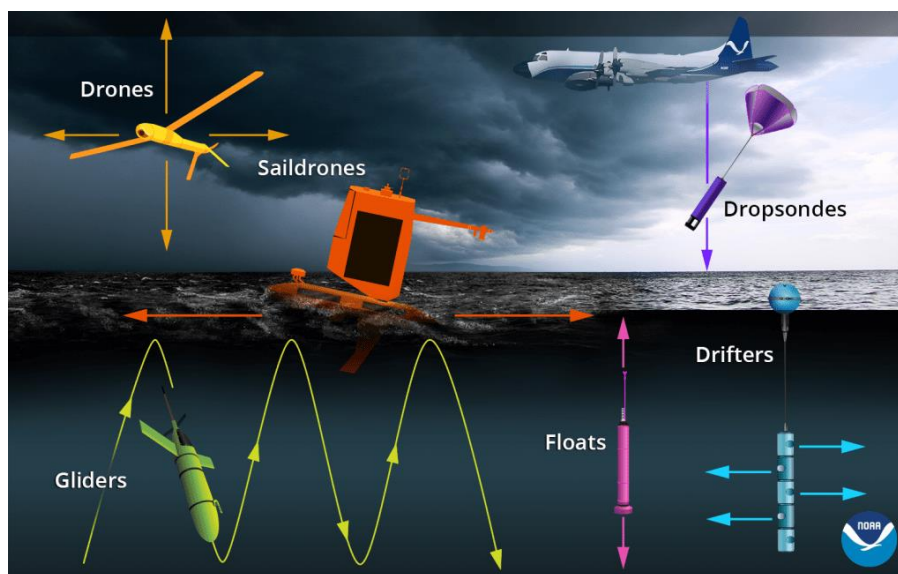


Figura 37. Drones para detección de huracanes [67].

Con este estudio [68] se pretende mejorar la comprensión de las fuerzas físicas que originan los huracanes, con la meta final de desarrollar pronósticos más precisos y alertas tempranas para las comunidades afectadas. Y como muestra la imagen anterior, esos serían algunos de los modelos de drones que se quieren utilizar. Por un lado, drones aéreos UAS para recolectar datos atmosféricos, saildrones o vehículos de superficie, USV (en inglés, *Unmanned Surface Vehicle*) para medir condiciones del océano y atmosféricas, también *Dropsondes*, que son una especie de sondas que son lanzadas desde aviones y caen en paracaídas midiendo datos atmosféricos, *gliders* que sería un vehículo submarino autónomo que recopila datos oceánicos, *floats* que se trata de un dispositivo flotante que miden variables oceánicas y por último, *drifters* o boyas que flotan con las corrientes, proporcionando datos de la superficie del mar.

Al final, toda esta autonomía con la que se está equipando a los drones gracias a la inteligencia artificial, está permitiendo realizar tareas complejas con mayor precisión y eficacia y está abriendo el camino a nuevas posibilidades de utilización.

La utilización de estos drones autónomos está permitiendo planificar rutas, evitar obstáculos en tiempo real, adaptarse a cambios en el entorno y tomar decisiones críticas de manera independiente. De aquí que surjan equipos como los vehículos de superficie no tripulados USV que funcionan de forma autónoma y que están revolucionando la inspección en infraestructuras *offshore*. Algunos de los diseños desarrollados hasta ahora, se explican en el siguiente apartado.

4.11 VEHICULOS DE SUPERFICIE AUTONOMOS Y NO TRIPULADOS

Los drones convencionales, guiados por control remoto y operados por pilotos capacitados, han demostrado ser una herramienta valiosa y versátil. Sin embargo, la evolución tecnológica no se ha detenido y el uso de vehículos de superficie no tripulados (USV), que además son autónomos, está llevando las capacidades de los drones a un nivel completamente nuevo.

Estos sistemas, en muchos casos, emplean modernos sistemas de navegación autónoma que combinan con GPS de alta precisión, LIDAR, sonar y cámaras de gran resolución. La adopción de estos sensores, les permiten a los USV mapear el entorno en tiempo real, evitando obstáculos y optimizando las rutas de inspección. Dependiendo de los sensores incorporados, pueden ser capaces de detectar diferentes problemas en las infraestructuras *offshore*, tanto en las partes sumergidas como en las partes que quedan por encima del agua.

El uso de algoritmos de aprendizaje automático y técnicas avanzadas de IA ha permitido una mejora significativa en la autonomía y eficiencia de los USV. Por ejemplo, la integración de técnicas de control multiagente ha mostrado un gran potencial para la coordinación y cooperación de múltiples USV en misiones complejas, como se describe en los trabajos de investigación recientes.

Algunos de estos vehículos de superficie autónomos, son presentados a continuación:

- C-Worker 7: es un vehículo de superficie autónomo ASV creado por ASV Global [69]. Está diseñado para aplicaciones de inspección y posicionamiento y puede eliminar la necesidad de barcos en estaciones o anclaje en el lecho marino. Este vehículo puede ser controlado desde un barco madre o desde una estación de control en tierra a través de comunicaciones por satélite. Los modos de control de este sistema incluyen seguimiento de puntos de referencia y líneas, mantenimiento de rumbo y trayectoria, mantenimiento de estación y control remoto.



Figura 38. C-Worker 7 [69]

- Blue Essence (Fugro): Ha sido uno de los primeros USV en recibir la aprobación por la Agencia Marítima y de Guardacostas (MCA) en el Reino Unido [70], para operar de forma totalmente remota con un ROV e inspeccionar parques *offshore*. Equipado con tecnología avanzada de comunicación y sensores de última generación, ha mostrado ser una solución eficiente y segura para operaciones de inspección.



Figura 39. *Blue Essence* [70]

- Hugin USV: Ørsted, ha diseñado un vehículo de superficie no tripulado para campañas de medición meteorológicas en el que ha integrado un LIDAR de la empresa ZX LIDAR. El prototipo se llama Hugin USV [71], costa de un sistema de navegación incorporado que le permite transitar desde la costa con diversos grados de autonomía. A parte de un equipo LIDAR para las medidas meteorológicas, tiene otros sensores que le permite estudiar el fondo marino y le ayuda a Ørsted a sus actividades de desarrollo de la fase inicial de los parques eólicos.



Figura 40. *Hugin USV* [71]

- Vendaval (Navantia): Navantia, junto con otras empresas han realizado diferentes pruebas del prototipo Vendaval USV [72] combinando su tecnología con los sistemas avanzados de adquisición de Eolos, la tecnología de drones autónomos de la Universidad de Sevilla y los drones de tecnología industrial de Alerion. Aquí han trabajado conjuntamente los vehículos no tripulados con sensores LIDAR y meteoceánicos así como drones autónomos. Estos diseños tienen a ser escalables según la necesidad de cada proyecto.

Además de estos modelos, existen otros como DriX de iXblue, Sea-kit, Armada Fleet de Ocean Infinity, Prozero, todos ellos capaces de transformar la inspección *offshore*, ofreciendo soluciones más seguras, eficientes y precisas.

A medida que la tecnología continúa avanzando, es probable que se vean más innovaciones y aplicaciones de estos vehículos. Los proyectos como ATLANTIS [73], financiado por el programa H2020 de la Unión Europea, están dedicados a desarrollar centros de pruebas para la validación de estas tecnologías en entornos reales. Además, estudios recientes [36] han destacado el potencial de los sistemas robóticos en la operación y mantenimiento de parques eólicos flotantes *offshore*, lo que podría reducir significativamente los costos y mejorar la seguridad de las operaciones.

A medida que la tecnología continúa avanzando, es probable que se vean más innovaciones y aplicaciones de estos vehículos. La integración de USV en operaciones *offshore* no solo mejora la seguridad y eficiencia, sino que también abre nuevas posibilidades para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos, posicionando a estos vehículos como componentes cruciales en la infraestructura de energía eólica *offshore* del futuro.

4.12 REALIDAD AUMENTADA Y REALIDAD VIRTUAL EN DRONES

La Realidad Aumentada (AR) y la Realidad Virtual (VR) están emergiendo como tecnologías revolucionarias en diversos sectores, incluyendo la inspección y mantenimiento de parques eólicos marinos. Estas tecnologías ofrecen numerosas ventajas que pueden mejorar la eficiencia y la seguridad de las operaciones en entornos *offshore*.

La Realidad Aumentada puede ser utilizada para proporcionar información en tiempo real a los pilotos de drones durante las inspecciones. Mediante el uso de gafas AR, los operadores pueden ver superposiciones de datos críticos directamente en su campo de visión. Esto incluye información sobre el estado de los aerogeneradores, datos de sensores, y rutas de inspección optimizadas. Esta capacidad permite a los pilotos de drones tomar decisiones informadas rápidamente, mejorando la precisión y eficiencia de las inspecciones.

El proyecto e-Park [74], liderado por Navantia S.A. y dotado con una financiación de 7 millones de euros del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), es una iniciativa que ha surgido combinando la tecnología de los drones, con la AR y VR. El objetivo que se busca con este proyecto es digitalizar las operaciones de mantenimiento de parques eólicos marinos mediante el uso de vehículos no tripulados, que, además, trabajen con AR y VR, para crear un gemelo digital del parque que permita modelizar su comportamiento y disponer de un software que reúna todos los datos en tiempo real.

Estas aplicaciones de AR y VR no solo mejoran la eficiencia y seguridad de las inspecciones, sino que también contribuyen a la formación de operadores más capacitados y preparados para enfrentar los desafíos del entorno marino.

5 CONCLUSIONES

La energía eólica marina está ganando cada vez más protagonismo en el ámbito energético mundial, gracias a su alta capacidad y creciente competitividad. Los parques eólicos offshore, ya sean de base fija o flotante, representan un desafío de ingeniería avanzada y se perfilan como catalizadores para transformar los puertos marítimos en centros neurálgicos de innovación y desarrollo, fundamentales para su construcción, operación y mantenimiento.

Una gestión eficiente de la operación y mantenimiento de esta tecnología asegura la seguridad de las estructuras y del personal técnico, que a menudo opera en condiciones adversas. Asimismo, incrementa la eficiencia operativa, disminuye los periodos de inactividad y optimiza la producción. Esto contribuye a extender la vida útil de los equipos e infraestructuras offshore, previene fallos costosos y promueve la sostenibilidad ambiental. Además, fomenta la adaptación a tecnologías emergentes y prácticas innovadoras.

La integración de drones o sistemas robóticos en las tareas de operación y mantenimiento (O&M) de parques eólicos offshore está suponiendo una transformación significativa en el sector energético. La evolución hacia soluciones tecnológicas avanzadas, como los sistemas robóticos autónomos, puede permitir no solo optimizar los costes operativos, sino también aumentar la eficiencia y seguridad de las actividades en parques eólicos offshore, cuyas condiciones ambientales adversas presentan retos inherentes.

En España, gracias a la reciente aprobación del Real Decreto 962/2024, que regula la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones ubicadas en el mar, la expansión de la energía eólica offshore seguramente comenzará a emerger considerablemente. Redes como CORDIS, que financian proyectos de investigación destinados a la incorporación de nuevas tecnologías en el sector energético, también contribuyen a la innovación, para ayudar a este crecimiento.

El uso de drones apoyado por tecnologías avanzadas e inteligencia artificial, presenta un escenario prometedor para el futuro de la energía renovable en el ámbito marino. Las sinergias entre innovación tecnológica, regulación y planificación estratégica están moldeando un sector más robusto, seguro y competitivo. La consolidación de estas soluciones en la operación y mantenimiento permitirá maximizar el aprovechamiento de los recursos eólicos, al tiempo que se mitigan los desafíos derivados de la complejidad operativa en alta mar.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Riveiro Rodríguez J A. Vehículo aéreo, procedimiento y sistema para la inspección de palas de aerogeneradores en movimiento. ES, 2 796 964 A1. 2020.
- [2] Williams R, Zhao F, Lee J. Global Offshore Wind Report 2022, Global Wind Energy Council (GWEC). 2022 [citado el 3 de abril de 2024]. Disponible en: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/06/GWEC-Global-Offshore-Wind-Report-2022.pdf>
- [3] Williams R, Zhao F. Global Offshore Wind Report 2023, Global Wind Energy Council (GWEC). 2023 [citado el 3 de abril de 2024]. Disponible en: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/08/GWEC-Global-Offshore-Wind-Report-2023.pdf>
- [4] Naciones Unidas. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) [Internet]. Glasgow: Naciones Unidas; 2021 [citado el 3 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- [5] Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS] [Internet]. Nueva York: Naciones Unidas; 2015 [citado el 3 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [6] O'Hagan A M. State of the Science Report, Chapter 11: Marine Spatial Planning and Marine Renewable Energy. United States; 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.2172/1633204>
- [7] European Commission. Blue Growth-opportunities for marine and maritime sustainable growth. [Internet]. COM (2012) 494 [citado el 5 de abril de 2024]. Disponible en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur211166.pdf>
- [8] Comisión Europea. El Pacto Verde Europeo.[Internet] COM(2019) 640 [citado el 5 de abril de 2024]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF
- [9] European Commission. EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future - EU monitor [Internet]. COM (2020)741. [citado el 8 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vldwjbykscwq>

- [10] European Commission. European Wind Power Action Plan-EU monitor. [Internet]. COM (2023)669. [citado el 9 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vwik7m1c3gyxp/vm7mfi6s7rzt>
- [11] European Commission. Delivering on the EU offshore renewable energy ambitions-EU monitor. [Internet]. COM (2023)668. [citado el 9 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vwik7m1c3gyxp/vm7mfi6s80zs>
- [12] The North Seas Energy Cooperation [Internet]. energy.ec.europa.eu. Disponible en: https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/high-level-groups/north-seas-energy-cooperation_en
- [13] Eurobitácora A. Plan de Interconexión del Mercado Báltico de la Energía [Internet]. Eurobitácora; 2015 [citado el 10 de abril de 2024]. Disponible en: <https://cdecomunidaddemadrid.wordpress.com/tag/plan-de-interconexion-del-mercado-baltico-de-la-energia/>
- [14] Wind energy in Europe: 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030 [Internet]. WindEurope. Disponible en: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>
- [15] Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar [Internet]. Madrid: miteco.gob.es; 2021. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias.html>
- [16] Asociación Empresarial Eólica. Libro Blanco de la industria Eólica Marina en España [Internet]. Madrid: Asociación Empresarial Eólica (AEE); 2022 [citado el 26 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://aeeolica.org/libro-blanco-de-la-industria-eolica-marina-en-espana/>
- [17] Ministerio de Transición Ecológica. BOE-A-2023-5704. Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, por el que se aprueban los planes de ordenación del espacio marítimo de las cinco demarcaciones marinas españolas (POEM). Boletín Oficial del Estado. 2023 Marzo 4; 54:32350-32578.
- [18] CEDEX. INFOMAR. Sistema de Información sobre el Medio Marino [Internet]. [citado el 11 de abril de 2024]. Disponible en: <https://infomar.miteco.es/>

- [19] Asociación Empresarial Eólica. La eólica en España [Internet]. [citado el 12 de abril de 2024]. Disponible en: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- [20] Chitteth Ramachandran R, Desmond C, Judge F, Serraris J J, Murphy J. Floating wind turbines: marine operations challenges and opportunities. Wind Energy Science [Internet]. 2022 Apr 19; 7(2):903-24. Disponible en: <https://wes.copernicus.org/articles/7/903/2022/>
- [21] Good practice guidelines [Internet]. www.gplusoffshorewind.com. [citado el 16 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.gplusoffshorewind.com/work-programme/workstreams/guidelines>
- [22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Proyecto de real decreto por el que se regula la producción de energía eléctrica en instalaciones ubicadas en el mar [Internet]. [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/participacion/2024/detalle-participacion-publica-k-653.html>
- [23] Real Decreto 962/2024, de 24 de septiembre, por el que se regula la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en instalaciones ubicadas en el mar. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Democrático. 24 de septiembre.
- [24] Gobierno de Canarias. Plataforma Oceánica de Canarias, PLOCAN [Internet]. [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://plocan.eu/en>
- [25] Gobierno Vasco. Biscay Marine Energy Platform, BiMEP [Internet]. [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.bimep.com/>
- [26] Xunta de Galicia. Zona Experimental de energías marinas de Punta Langosteira [Internet]. INEGA, Instituto Enerxético de Galicia [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.inega.gal/es/proyectos/zona-experimental-energias-marinas>
- [27] Plataforma Oceánica de Canarias. LEAF: Liderazgo español para el avance de la eólica flotante [Internet]. [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://plocan.eu/proyectos/leaf-liderazgo-espanol-para-el-avance-de-la-eolica-flotante>
- [28] Staubach P, Wichtmann T. Long-term deformations of monopile foundations for offshore wind turbines studied with a high-cycle accumulation model. Computers and Geotechnics. 2020 Agosto; 124:103553.

- [29] Equinor. Hywind Scotland [Internet]. www.equinor.com. [citado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>
- [30] Sierra J L S, Ouro P. Arranca la eólica marina en España: retos e incertidumbres de instalar 200 aerogeneradores flotantes en el mar [Internet]. The Conversation. 2023. Disponible en: <https://theconversation.com/arranca-la-eolica-marina-en-espana-retos-e-incertidumbres-de-instalar-200-aerogeneradores-flotantes-en-el-mar-201308>
- [31] Durakovic A. Europe's First Commercial-Scale Floating Offshore Wind Farm Secures All Planning Approvals [Internet]. Offshore Wind. 2024 [citado el 24 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.offshorewind.biz/2024/04/22/europes-first-commercial-scale-floating-offshore-wind-farm-secures-all-planning-approvals/>
- [32] Bradley M, Nathan H. The future potential role of offshore multipurpose connectors [Internet]. Celtic Sea Power. 2023 [citado el 24 de abril de 2024]. Disponible en: <https://celticseapower.co.uk/wp-content/uploads/2023/08/CFAR-OC-038-25022023-OREC-Future-potential-role-of-offshore-multipurpose-connectors-Issued.pdf>
- [33] Liu Y, Hajj M, Bao Y. Review of robot-based damage assessment for offshore wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 158, 2022, 112187, ISSN 1364-0321, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112187>.
- [34] Rinaldi G, Thies P R, Johanning L. Current Status and Future Trends in the Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines: A Review. Energies. 2021; 14(9):2484. <https://doi.org/10.3390/en14092484>.
- [35] Shafiee M, Zhou Z, Mei L, Dinmohammadi F, Karama J, Flynn D. Unmanned Aerial Drones for Inspection of Offshore Wind Turbines: A Mission-Critical Failure Analysis. Robotics. 2021; 10(1):26. <https://doi.org/10.3390/robotics10010026>.
- [36] Khalid O, Hao G, Desmond C, Macdonald H, Devoy McAuliffe F, Dooly G, Hu W. Applications of robotics in floating offshore wind farm operations and maintenance: Literature review and trends. Wind Energy. 2022 Jul 25. doi: 10.1002/we.2773. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.2773>.
- [37] Superior UTM Communication System [Internet]. SUCOM. [citado el 2 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://sucom.tech/en/>

- [38] Cloud Ground Control [Internet]. Cloud Ground Control, CGC. [citado el 2 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.cloudgroundcontrol.com/>
- [39] Meteobase - The Home of Our Meteodrone [Internet]. Meteomatics [citado el 2 de mayo de 2024]. Disponible en : <https://www.meteomatics.com/en/meteobase/>
- [40] Watereye Research & Innovation Actions – O&M tools integrating accurate structural health in offshore energy [Internet]. Watereye-project.eu. 2020 [citado el 2 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://watereye-project.eu/>
- [41] Sistemas robóticos de cuidado de aerogeneradores. Aeronos [Internet]. Sistemas robóticos de cuidado de aerogeneradores. Aeronos. 2024 [Citado 20 de junio de 2024]. Disponible en: <https://aeronos.com/es/>.
- [42] Moguel Márquez JE. Una arquitectura orientada a servicios y dirigida por eventos para el control inteligente de UAVs multipropósito [Internet]. dialnet.unirioja.es. 2018.[citado el 20 de junio de 2024] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=245477>
- [43] SubUAS. The Naviator [Internet]. [citado el 3 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://thenaviator.com/>
- [44] BOE. Ley 14/2014, de 24 de julio, de Navegación Marítima. BOE-A-2014-7877 Jefatura del Estado.
- [45] Skyfront. Leaders in long endurance hybrid drones [Internet]. [citado el 3 de mayo de 2024]. Disponible en: https://skyfront.com/?gad_source=1&gclid=EAlaIQobChMIncTN363xhQMVueahoCR2liQ3SEAAAYAiAAEgJgFvD_BwE
- [46] H2 Dron Energy. Tecnología de hidrógeno para UAVs [Internet]. [citado el 3 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://h2dronenergy.com/>
- [47] Reed L. Marshall Futureworx, ISS Aerospace and Sees.ai to provide offshore wind farm inspection services. ISS Aerospace [Internet]. ISS Aerospace. 2023 [Citado el 2 de Agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.issaerospace.com/marshall-futureworx-iss-aerospace-and-sees-ai-to-provide-offshore-wind-farm-inspection-services/>.
- [48] Ministerio de Fomento. AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea [Internet]. Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/>

- [49] Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. Comisión Europea, Diario Oficial de la Unión Europea EUR-Lex. 24 mayo 2019.
- [50] Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas (DO L 152 de 11.6.2019, pp. 1-40).
- [51] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Plan de Acción Nacional para el Despliegue del *U-space* [Internet]. 2022 [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/aviacion/220208_plan_de_despliegue_U-space_vfinal_acordada.pdf
- [52] Reglamento de Ejecución Europeo (UE) 2021/664 de la Comisión de 22 de abril de 2021 sobre un marco regulador para el *U-space* (Texto pertinente a efectos del EEE). Unión Europea. DOUE 23 de abril de 2021.
- [53] Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665 de la Comisión de 22 de abril de 2021 por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373 en lo que respecta a los requisitos para los proveedores de servicios de gestión del tránsito aéreo/navegación aérea y otras funciones de la red de gestión del tránsito aéreo en el espacio aéreo *U-space* designado en el espacio aéreo controlado. Unión Europea. DOUE de 23 de abril de 2021.
- [54] Reglamento de Ejecución (UE) 2021/666 de la Comisión de 22 de abril de 2021 por el que se modifica el Reglamento (UE) n.º 923/2012 en lo que se refiere a los requisitos para la aviación tripulada que opera en el espacio aéreo *U-space*. Unión Europea. DOEU de 22 de abril de 2021.
- [55] Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). Eventos sobre Drones [Internet]. [citado el 30 de mayo de 2024]. Disponible en: https://eventos.cdti.es/agenda/Drones_IMPACTO_ACEPTACION_20240523
- [56] European Commission. Community Research and Development Information Service (CORDIS) [Internet]. Europa.eu; 2022. [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/es>
- [57] European Commission. Autonomous self-charging drones can increase transport safety in Europe [Internet]. CORDIS; [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en:

<https://cordis.europa.eu/article/id/446821-autonomous-self-charging-drones-can-increase-transport-safety-in-europe>

- [58] European Commission. AI flight plant ensure drones on right course.[Internet]. CORDIS; [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/446826-ai-flight-plans-ensure-drones-on-right-course/es>
- [59] European Commission. Innovative framework for cohesive independent and reliable drone operations. [Internet]. CORDIS; [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/444650-innovative-framework-for-cohesive-independent-and-reliable-drone-operations/es>
- [60] RODENT network - COMP4DRONES [Internet]. c4d.lias-lab.fr. [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: https://c4d.lias-lab.fr/index.php/RODENT_network
- [61] European Commission. AI powered drones for difficult maintenance tasks. [Internet]. CORDIS; [citado el 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/251211-ai-powered-drones-for-difficult-maintenance-tasks/es>
- [62] Hellin D. H1-1000 [Internet]. Dronerpa. 2021 [Citado 22 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.dronerpa.com/es/productos/multirotors/h1-1000>.
- [63] European Commission. Innovative framework for cohesive independent and reliable drone operations. [Internet]. CORDIS; 2023 [citado el 24 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/444650-innovative-framework-for-cohesive-independent-and-reliable-drone-operations/es>
- [64] European Commission. Hybrid fuel-electric multicopter RPAS with 10 times more flight time than current solutions in the market [Internet]. CORDIS; 2018 [citado el 24 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/444650-innovative-framework-for-cohesive-independent-and-reliable-drone-operations/es>
- [65] DLR – DLR’s superARTIS facility in Braunschweig [Internet]. www.dlr.de. [citado el 24 de mayo de 2024]. Disponible en: https://www.dlr.de/en/latest/news/2022/01/20220316_dlr-measures-flow-phenomena-around-wind-turbines-with-a-swarm-of-drones
- [66] DLR – Measures flow phenomena around wind turbines [Internet]. www.dlr.de. [citado el 24 de mayo de 2024]. Disponible en:

https://www.dlr.de/en/latest/news/2022/01/20220316_dlr-measures-flow-phenomena-around-wind-turbines-with-a-swarm-of-drones

- [67] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [Internet]. Noaa.gov; 2022. Disponible en: <https://www.noaa.gov/>
- [68] Communications A. NOAA and Saildrone launch seven hurricane tracking Surface drones. [Internet]. Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de NOAA; 2022 [citado el 24 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.aoml.noaa.gov/es/noaa-and-saildrone-launch-seven-hurricane-tracking-surface-drones/>
- [69] L3Harris. C-Worker 7 ASV [Internet]. [citado el 27 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/c-worker-7-asv>
- [70] Fugro. Fugro's Blue Essence Completes World's First Fully Remote Offshore Wind ROV Inspection [Internet]. Fugro News. [citado el 27 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.fugro.com/news/business-news/2023/fugro-blue-essence-completes-worlds-first-fully-remote-offshore-wind-rov-inspection>
- [71] Ørsted. Ørsted invents and patents uncrewed surface measuring vessel [Internet]. [citado el 27 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://orsted.com/en/media/news/2023/06/13698206>
- [72] SEPI. NAVANTIA realiza con éxito las primeras pruebas de vehículos autónomos no tripulados aplicados a la eólica marina [Internet]. SEPI. [citada el 27 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.sepi.es/es/sala-de-prensa/noticias/navantia-realiza-con-exito-las-primeras-pruebas-de-vehiculos-autonomos-no>
- [73] ATLANTIS H2020 Project. [Internet]. [Citado el 24 de Julio de 2024]. Disponible en: <https://www.atlantis-h2020.eu/test-center/>.
- [74] NAVANTIA. Primeros pasos hacia el gemelo digital de parques eólicos marinos: el CDTI apoya un proyecto liderado por Navantia [Internet]. Navantia. [citado el 31 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/actualidad/notas-prensa/primeros-pasos-hacia-el-gemelo-digital-de-parques-eolicos-marinos-el-cdti-apoya-un-proyecto-liderado-por-navantia/>

ANEXO: LISTA DE ACRÓNIMOS

AEE: Asociación Empresarial Eólica

AESA: Agencia Estatal de Seguridad Aérea

AI: Inteligencia Artificial / Artificial Intelligence

ANSP: Proveedor de servicios de navegación aérea / Air Navigation Service Provider.

APAC: Asia-Pacífico / Asia-Pacific

AR: Realidad Aumentada / Augmented Reality

ASV: Vehículo de Superficie Autónomo / Autonomous Surface Vehicle

AUV: Vehículo Submarino Autónomo / Autonomous Underwater Vehicle

BiMEP: Plataforma de Energía Marina de Vizcaya/ Biscay Marine Energy Platform

BVLOS: Más Allá de la Línea de Visión Visual / Beyond Visual Line of Sight

CA: Corriente alterna

CC: Corriente continua

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CEIT: Centro Tecnológico de Euskadi

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional/ Computational Fluid Dynamics

CGC: Cloud Ground Control

CORDIS: Community Research and Development Information Service

EGNOS: Sistema Europeo de Superposición de Navegación GEoestacionaria / European Geostationary Navigation Overlay Service

FiT: Tarifas de Alimentación / Feed-in Tariffs

FPV: Vista en Primera Persona / First Person View

GBS: Estructura de Base Gravitacional / Gravity Based Structure

GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite / Global Navigation Satellite System

GPS: Sistema de Posicionamiento Global / Global Positioning System

GWEC: Consejo Global de Energía Eólica / Global Wind Energy Council

IRENA: Agencia Internacional de Energías Renovables / International Renewable Energy Agency

LATAM: América Latina / Latin America

LEAF: Liderazgo Español para el Avance de la Eólica Flotante

LCOE: Costo Nivelado de Energía / Levelized Cost of Energy

LIDAR: Detección y Rango de Luz / Light Detection and Ranging

MCA: Agencia Marítima y de Guardacostas / Maritime and Coastguard Agency

MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica

MSP: Planificación Espacial Marina / Marine Spatial Planning

NDT: Ensayos No Destructivos / Non-Destructive Testing

NOAA: Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica / National Oceanic and Atmospheric Administration

NSEC: Cooperación Energética del Mar del Norte / North Seas Energy Cooperation

O&M: Operación y Mantenimiento / Operation and Maintenance

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible / Sustainable Development Goals

OPEX: Gastos Operativos / Operating Expenses

PANDU: Plan de Acción Nacional para el Despliegue de *U-space*

PLOCAM: Plataforma Oceánica de Canarias / Oceanic Platform of the Canary Islands

POEM: Planificación de Ordenación del Espacio Marítimo / Maritime Spatial Planning

ROV: Vehículo Operado Remotamente / Remotely Operated Vehicle

SERA: Reglamento Europeo de Reglas del Aire / Standardised European Rules of the Air

SORA: Evaluación de Riesgos de Operaciones Específicas / Specific Operations Risk Assessment

STS-ES: Estándar Escenarios / Standard Escenarios TLP: Plataforma de Tensión / Tension Leg Platform

UAS: Sistema Aéreo no Tripulado/ Unmanned Aerial System

UAV: Vehículo Aéreo No Tripulado / Unmanned Aerial Vehicle

USV: Vehículo de superficie No Tripulado / Unmanned Surface Vehicle

VLOS: Línea de Vista Visual / Visual Line of Sight

VR: Realidad Virtual / Virtual Reality

ZAP: Zonas de alto potencial / High Potential Zone

ZAPER: Zona de Alto Potencia para Energía Renovable / High Potential Zones for Renewable Energy Development

ZUPER: Zona de Uso Prioritario para Energía Renovable / Priority Use Zone for Renewable Energy

